



Quantification par imagerie tridimensionnelle de l'extension continentale et des déplacements associés : exemples au Kenya et au Yémen

Frederic Thoue

► To cite this version:

Frederic Thoue. Quantification par imagerie tridimensionnelle de l'extension continentale et des déplacements associés : exemples au Kenya et au Yémen. Tectonique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1993. Français. NNT: . tel-00743944

HAL Id: tel-00743944

<https://theses.hal.science/tel-00743944>

Submitted on 22 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

présentée par

Frédéric THOUÉ

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1

(Arrêtés ministériels du 5 Juillet 1984 et du 30 Mars 1992)

Spécialité : Sciences de la Terre

**Quantification par imagerie
tridimensionnelle
de l'extension continentale
et
des déplacements associés.
Exemples au Kenya et au Yémen.**

25 AOUT 2003

Date de soutenance : 12 Novembre 1993

Composition du jury :

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

CARON Jean-Michel	Examineur
GRATIER Jean-Pierre	Directeur de thèse
HUCHON Philippe	Rapporteur
MERCIER Jacques	Rapporteur
VIDAL Gérard	Directeur de thèse
XAVIER Jean-Paul	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire des Sciences de la Terre, URA CNRS 726.
Ecole Normale Supérieure de Lyon, Université Claude Bernard - Lyon 1

THESE

présentée par

Frédéric THOUÉ

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1
(Arrêtés ministériels du 5 Juillet 1984 et du 30 Mars 1992)

Spécialité : **Sciences de la Terre**

Quantification par imagerie tridimensionnelle de l'extension continentale et des déplacements associés. Exemples au Kenya et au Yémen.

Date de soutenance : 12 Novembre 1993

Composition du jury :

CARON Jean-Michel	Examineur
GRATIER Jean-Pierre	Directeur de thèse
HUCHON Philippe	Rapporteur
MERCIER Jacques	Rapporteur
VIDAL Gérard	Directeur de thèse
XAVIER Jean-Paul	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire des Sciences de la Terre, URA CNRS 726.
Ecole Normale Supérieure de Lyon, Université Claude Bernard - Lyon 1

10109173

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Gérard Vidal, pour la confiance qu'il m'a accordée au cours de ces trois années. Son expérience d'objets aussi hétéroclites que les stries, les pointeurs, et autres pixels en vraies fausses couleurs et stéréo., sans parler des nombreuses discussions, parfois tardives (pardon à Margaux et Sylvie !), m'ont été grandement profitables.

Je remercie vivement Jean-Pierre Gratier qui a participé à la restauration puis l'ajustement de ce travail, et guidé mes pas le long des trajectoires de déplacements des montagnes grenobloises aux plages de sable chaud de Santa Barbara !

Je tiens à remercier Jean-Michel Caron de m'avoir accueilli dans le laboratoire. Ses garde-fous géométriques m'ont été d'un précieux secours et j'espère ne jamais lui rendre la casquette d'enseignant qu'il m'a prêtée !

Je suis reconnaissant à Jacques Mercier d'apporter son expérience en Tectonique et Géodynamique en acceptant de juger ce travail.

Philippe Huchon m'a fait profiter de sa connaissance du Yémen, tant géologique que culturelle et a accepté de juger ce travail. Je l'en remercie vivement.

Je remercie tout particulièrement Jean-Paul Xavier pour sa participation à ce jury. Ce travail aurait été tout autre si la société Elf-Aquitaine qu'il représente n'avait pas mis à ma disposition les images satellitaires et la logistique sur le terrain.

Par les discussions communes, lors de la mission de terrain au Yémen, en Novembre 1991, Hervé Bertrand, Catherine Deniel, Florence Jestin, Pierre Rochette, et Philippe Vidal ont contribué à la réalisation d'une partie de ce travail. Qu'ils en soient remerciés.

En vertu du vieil adage populaire selon lequel "il vaut mieux deux bons qui savent plutôt qu'un mauvais qui cherche", les compétences informatiques de Jean-Louis Moisy et Giles Carré ont souvent été sollicitées. La partie technique de ce travail leur doit beaucoup. Merci à eux deux pour leur efficacité et leur sympathie.

Merci à Pascal Allemand, dit "Pascool", pour les discussions toujours "fruitful", l'entraînement physique théorique et sportif, les blagues de collégiens (et les autres) et les foires aux vins !

Merci à Jacques Bouffette, dit "Keuj" (keuj...), pour les dictons (ctons...) du jour et les soirées Apéro-Bolino-Bons Bordeaux-Footchebo-Dijo (jo...) !

Merci à Gilles Chazot pour sa passion communicative des stages CIES, la musique de Radio Bleue et les concours de Tétris !

Un GRAND merci à Corinne Uberty et Nicole Pisinger, secrétaires d'exception, dont l'efficacité administrative, la patience, les tableaux "magiques" sur Excel, les agrafeuses défectueuses, les gâteaux au chocolat et les repas de Noël ne s'oublient pas !

Merci à tous ceux (chercheurs, techniciens, étudiants) qui ont partagé ces trois années au Laboratoire des Sciences de la Terre, et contribué à y faire régner une bonne ambiance. Parmi eux, Véro Gardien, Yves Géraud, Stéphanie Duchène, Manu Martelat, Eric Pili, Michèle Emery, Evelyne Grisard, les fondateurs et membres actifs du MAGMA, et bien d'autres encore qui j'espère ne m'en voudront pas de n'être cités ici. Ces quelques lignes n'y suffiraient pas !

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement mes amis, et surtout Philippe, Céline et mes parents. Sans leur soutien attentionné de tous les instants, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Ce travail, effectué au laboratoire de Sciences de la Terre de l'ENS Lyon, a bénéficié d'un financement CNRS-INSU dans le cadre du projet Dynamique et Bilan de la Terre (Thème V, dynamique globale).

Sommaire

Remerciements	ii
Liste des figures	vii
Chapitre I Introduction	1
Chapitre II Bases méthodologiques	5
II.1 Imagerie satellitaire	6
1 Caractéristiques des images utilisées	
Quelques définitions	
Caractéristiques des satellites SPOT et Landsat	
Le satellite Landsat	
Le satellite SPOT	
Format des données numériques	
Images utilisées	
2 Manipulations des images numériques	
Corrections des images	
Traitements des images	
Définitions et traitements utilisés	
Exemples de traitements utilisés	
Restitution et interprétation des images à différentes échelles	
II.2 Modèles numériques de terrain (MNT)	19
1 Définitions	
2 Principe de calcul d'un MNT	
Appariements de points	
Restitution des altitudes	
Limites au calcul des MNT	
3 Extraction des coordonnées de points homologues sur les images SPOT	
4 Corrections et traitements des MNT	
Corrections altimétriques et interpolation des altitudes sur une grille régulière	
Améliorations supplémentaires	
Juxtaposition de MNT :	
Amélioration des bordures du MNT:	
Lissage des MNT	
Réalisation de vues perspectives	
Calcul des ortho-images	
Visualisations 3D	
II.3 Inversion des données microtectoniques	36
1 Méthode d'inversion utilisée	
2 Comparaison de méthodes d'inversion	

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

25 AOÛT 2003

Chapitre III	Cadre géologique des objets étudiés	43			
III.1	Géologie du Gregory Rift (Kenya)	44			
1	Cadre régional				
2	Géométrie des structures				
3	Contexte géophysique				
4	Problématique				
III.2	Géologie du Yémen	48			
1	Cadre régional				
2	Géométrie des structures				
	Structures orientées N40 à N70				
	Structures orientées N90 à N100				
	Structures orientées N120 à N140				
	Extension associée				
3	Données géophysiques				
4	Chronologie des déformations au Yémen				
5	Problématique				
III.3	Extension sur la marge sud du Yémen	56			
1	Définition et localisation des secteurs d'étude				
2	Analyse structurale des secteurs choisis				
	Secteur de Umm Shatt				
	Cinématique locale				
	Secteur de Dhala				
	Cinématique locale				
	Secteur de Ba'tays				
	Cinématique locale				
3	Caractères comparés des trois secteurs				
4	Implications régionales				
Chapitre IV	Géométrie de la fracturation du Gregory Rift (Kenya)	77			
IV.1	Interprétations structurales	77			
1	Localisation du secteur d'étude				
2	Interprétation des images Landsat				
3	Interprétation des images SPOT				
4	Précision de l'interprétation				
IV.2	Quantification des paramètres de la fracturation du Gregory Rift	82			
1	Analyse individuelle des failles				
	Méthode				
	Direction				
	Longueur				
	Rejet				
	Espacement des failles				
	Analyse des résultats				
	Distribution des longueurs de failles				
2	Analyse de la population de failles				
	Méthode				
	Extension				
	Distribution des longueurs cumulées de failles				
	Densité de fracturation				
	Analyse des résultats				
	Dimension fractale				
	Notion de géométrie fractale en géologie				
	Principe de mesure				
	Résultats				98
IV.3	Discussion				
1	Géométrie du Gregory Rift				
2	Description du réseau de failles				
3	Validité des résultats				
IV.4	Conclusions à cette étude				100
1	Répartition de la fracturation dans le rift				
2	Limites méthodologiques				
Chapitre V	Quantification de l'extension sur la marge sud du Yémen	103			
V.1	Géométrie de la zone déformée	104			
1	Identification d'un horizon-repère				
2	Cartographie de la géométrie des blocs				
3	Mesure de l'orientation des blocs basculés				
	Principe				
	Repérage des marqueurs géologiques sur les MNT				
	Calcul de l'orientation des marqueurs				
V.2	Modélisation des blocs basculés	120			
1	Hypothèses sur la géométrie tridimensionnelle des blocs				
2	Calcul des modèles				
	Modèle PLAN				
	Modèle FLEXURÉ				
3	Validité des modèles				
V.3	Restauration des structures déformées	129			
1	Modèle PLAN				
2	Modèle FLEXURÉ				
	Principe du dépliage des structures				
	Validation du dépliage				
3	Comparaison des deux modèles				
4	Ajustement des blocs restaurés				
	Principe				
	Détermination d'un référentiel fixe				
	Secteur de Umm Shatt				
	Secteur de Ba'tays				

	Tracé des trajectoires de dépliage ou de débasculement	
	Ajustement des blocs	
V.4	Quantification de l'extension	145
1	Principe de calcul et limites	
2	Résultats	
	Secteur de Umm Shatt	
	Secteur Bat'ays	
3	Discussion	
V.5	Analyse des déplacements associés à l'extension	150
1	Champs de déplacements 2D	
	Principe de détermination	
	Interprétation des champs de déplacements 2D dans le secteur de Umm Shatt	
	Cartographie des déplacements 2D	
	Minimisation des déplacements 2D	
	Rotations de blocs autour d'axes verticaux	
	Interprétations des déplacements 2D dans le secteur de Ba'tays	
2	Champs de déplacements 3D	
	Méthodologie	
	Distribution des vecteurs 3D — modélisation de stries	
3	Discussion	
V.6	Conclusions	168
Chapitre VI	CONCLUSIONS GENERALES	171
VI.1	Cinématique de l'extension sur la marge sud du Yémen	171
VI.2	Synthèse méthodologique	175
1	Contributions des données utilisées	
2	Validité du traitement des données	
VI.3	Géométrie de la fracturation des zones déformées	178
VI.4	Perspectives	179

Liste des figures

Figure II.1	Principe d'acquisition (a), de stockage (b) et de restitution (c) d'une image satellitaire. La colonne de gauche représente l'image, et la colonne de droite, les techniques d'acquisition.	7
Figure II.2	Principe d'acquisition de couples stéréoscopiques avec le satellite SPOT [d'après SPOT Diffusion]. Cette figure illustre les possibilités de dépointage des capteurs du satellite SPOT, ainsi que le principe de calcul du rapport B/H pour une scène donnée. . .	9
Figure II.3	a- Principe de repérage des images SPOT sur la G.R.S.; b- Extrait de la G.R.S focalisé sur le Yémen. Chaque symbole rond représente le centre d'une scène [d'après SPOT Diffusion].	10
Figure II.4	Tableau comparatif des caractéristiques des images numériques des satellites Landsat TM et SPOT.	11
Figure II.5	Localisation des images utilisées au cours de ce travail. a-Kenya; b-Yémen.	12
Figure II.6	Effet de la rotation de la Terre et du mouvement du satellite au cours de l'acquisition des données [d'après Richards, 1986]. a- Distorsion de l'image du fait de la rotation de la Terre; b- Distorsion de l'image du fait des variations d'altitude du satellite. . . .	13
Figure II.7	Exemples d'amélioration du contraste d'une image. L'extrait présenté correspond au canal 4 de la scène Landsat TM 165-51 (échelle = 1/500 000). a- Image brute; b- Image égalisée; c- Image étalée. Pour chaque image, l'histogramme de répartition des pixels est présenté.	17
Figure II.8	Exemples de filtrages d'un extrait de la scène panchromatique SPOT 149-323 (échelle = 1/100 000). Chaque filtrage est référencé dans le cadre situé en haut à gauche. . .	18
Figure II.9	Identification de la zone de recouvrement sur les scènes SPOT 146-324, avant l'extraction de points homologues. Le cadre en trait continu représente la scène du 19-05-1988, et le cadre en traits pointillés, la scène du 02-12-1988.	21
Figure II.10	Repérage de points homologues sur deux images panchromatiques du satellite SPOT avant le calcul du MNT. Chaque point (cercle noir) correspond à un point caractéristique, facilement identifiable sur les deux images du couple. Il est repéré au pixel près, sur les deux images, par sa position en ligne et en colonne.	22
Figure II.11	Localisation des points issus du calcul du MNT dans le repère géographique utilisé pour ce calcul. La figure présentée comporte 1 236 910 points. Les zones en blancs (pas de points calculés) correspondent à des zones où l'auto-corrélation numérique n'a pu être réalisée (nuages, variations importantes de radiométrie entre les deux images ...). . .	24
Figure II.12	a- Visualisation en perspective du MNT calculé à partir du couple stéréoscopique 146-324, après interpolation sur une grille au pas de 100 m; b- Localisation des fenêtres de corrections des erreurs altimétriques sur la visualisation en courbes de niveaux. . .	26
Figure II.13	Principe de corrections des erreurs altimétriques identifiées sur le MNT interpolé et appliquées sur le semis de points. La coupe A-B à travers la fenêtre comparative visualise les valeurs d'altitude utilisées pour le calcul de la régression.	27
Figure II.14	Comparaison d'un MNT brut interpolé sur une grille au pas de 100 m et du MNT corrigé correspondant. (visualisation en courbes de niveaux et en perspective). L'équidistance sur les vues en courbes de niveaux est de 200 mètres. Les vues en perspective sont tracées sans exagération verticale.	28
Figure II.15	Repérage des zones de recouvrement des MNT calculés séparément et cartographie des variations d'altitude pour chaque site de comparaison.	30
Figure II.16	Succession des étapes conduisant aux corrections des bordures non-régulières du MNT calculé sur la scène SPOT 149-323.	31
Figure II.17	Visualisation en courbes de niveaux et en perspective des résultats du lissage du MNT calculé à partir du couple d'images SPOT 146-324. a- MNT brut; b- MNT corrigé; c- MNT lissé.	33
Figure II.18	Apport de l'interpolation pour le rendu des vues perspectives. a- Vue sans interpolation, b- Vue avec interpolation. La vue avec interpolation présente un rendu meilleur, mais il est impossible de localiser précisément les pixels.	35
Figure II.19	Représentation des plans de faille et des stries associées en projection isosurface (canvas de Schmidt) et histogramme de répartition de l'écart angulaire des stries théoriques calculées pour ces plans, dans le cas du site monphasé.	38
Figure II.20	Résultats comparés des méthodes d'inversion — site monphasé	39
Figure II.21	Résultats comparés des méthodes d'inversion — site polyphasé	39
Figure II.22	Représentation des plans de faille et des stries associées en projection isosurface (canvas de Schmidt) et histogramme de répartition de l'écart angulaire des stries théoriques calculées pour ces plans, dans le cas du site polyphasé.	40
Figure II.23	Répartition des stries dans chacune des phases d'extension déterminées lors de l'analyse du site polyphasé.	41

Figure III.1	Schéma général du rift Est-africain [d'après Chorowicz et al, 1987]. Le cadre centré sur le Gregory Rift situe plus précisément le secteur étudié (E = Elgon; K= Kilimandjaro; Ny = Nyanza Rift).	43
Figure III.2	Evénements géologiques principaux concernant le Gregory Rift.	44
Figure III.3	Schéma structural du Gregory Rift d'après Verney Green et Meyer [1992]. Les bassins de Turkana (A), Baringo-Bogoria (B), Nakuru-Naivasha (C) et Magadi-Natron (D) sont séparés par des zones d'accommodation (AZ). Les cadres en trait continu correspondent aux zones couvertes par les images Landsat et SPOT.	45
Figure III.4	Localisation du Yémen sur la jonction triple.	48
Figure III.5	Colonne stratigraphique simplifiée des formations géologiques couvrant l'ensemble du Yémen, d'après Tard et al [1991] et Menzies et al [1992].	49
Figure III.6	Carte géologique simplifiée du Yémen, d'après Huchon et al [1991], Tard et al [1991] et Menzies et al [1992].	50
Figure III.7	Mosaïque d'images Landsat TM sur le Yémen.	52
Figure III.8	Interprétation structurale réalisée à partir de la mosaïque d'images Landsat TM au 1/500 000 focalisées sur le Yémen. Les cadres correspondent aux secteurs du Sud-Yémen qui font l'objet d'une étude structurale détaillée.	53
Figure III.9	a- Composition colorée réalisée à partir des canaux 1, 4 et 7 de la scène Landsat TM 166-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Umm Shatt. Les dykes sont représentés sur cette carte par des tiretés épais.	58
Figure III.10	Morphologie d'un dyke intrusif dans des trapps au dos d'un bloc basculé.	60
Figure III.11	Carte structurale interprétative du secteur de Umm Shatt. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues. Le cadre intérieur correspond à la portion de ce secteur qui sera étudiée dans le chapitre 5.	61
Figure III.12	a- Composition colorée réalisée à partir du traitement des canaux 3, 4 et 7 des quarts Nord-Est et Sud-Est de la scène Landsat TM 165-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Dhala.	64
Figure III.13	Carte structurale interprétative du secteur de Dhala. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues.	66
Figure III.14	a- Composition colorée réalisée à partir du traitement des canaux 3, 4 et 7 du quart Sud-Est de la scène Landsat TM 165-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Ba'tays. Le trait qui rejoint les points A et B correspond à la coupe illustrée sur la figure III.15. La zone figurée en pointillés correspond à un slump dans les séries jurassiques.	68
Figure III.15	a- Coupe interprétative de la déformation en blocs basculés du secteur de Ba'tays. L'exagération verticale est de 2. La coupe est localisée sur la figure III.14b. Le cadre tracé sur la coupe situe la figure III.17; b- Vue perspective du Sud-Est du secteur de Ba'tays. La ligne blanche correspond à la coupe interprétative (a).	70
Figure III.16	a- Vue perspective des séries jurassiques de la partie ouest du secteur de Ba'tays. Elle illustre les failles normales N140 (flèches) qui affectent seulement la partie supérieure des séries jurassiques; b- Vue perspective de l'Est du secteur de Ba'tays, depuis le Nord-Est. Les séries du Jurassique supérieur apparaissent en teintes claires, celles du Jurassique inférieur en gris clair, et le socle en gris sombre ou noir.	71
Figure III.17	Plis d'entraînement dans la couverture sédimentaire du Jurassique supérieur, au Nord-Est de Ba'tays (voir figure III.15 pour la localisation). a- Photographie; b- Interprétation.	72
Figure III.18	Carte structurale interprétative du secteur de Ba'tays. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues. Le cadre intérieur correspond à la portion de ce secteur étudiée dans le chapitre 5.	74
Figure III.19	Carte interprétative de la marge sud-yéménite. Les flèches représentent les directions d'extension obtenues à partir de l'étude structurale.	76
Figure IV.1	a- Interprétation structurale des images Landsat 2. Seules les failles identifiées sur les images sont reportées; b- Schéma de disposition des bassins et des zones d'accommodation dans le secteur étudié [d'après Bosworth, 1987 et Verney-Green et al, 1991].	79
Figure IV.2	a- Extrait de la scène SPOT 137-350 couvrant une partie du Gregory Rift. La largeur de la scène est de 25 km environ; b- Interprétation structurale de la scène SPOT 137-350 et localisation des coupes transverses au rift. L'utilisation de ces coupes est présentée dans le paragraphe IV.2.1.	80
Figure IV.3	Longueur des failles en fonction de leur rejet. Le diagramme est construit pour les failles du secteur de Bogoria. Les symboles pleins représentent les valeurs moyennes de longueur pour chaque classe de rejet.	84

Figure IV.4	Répartition des failles depuis le centre du rift jusqu'aux bords du rift. Chaque barre verticale représente le rejet estimé de la faille. L'origine des coupes est placée à gauche, et correspond à l'axe du rift.	85
Figure IV.5	Analyse des orientations des failles sur l'image SPOT. a- Rosace de directions de toutes les failles mesurées sur le rift; b- Rosaces des directions des failles mesurées sur chacune des coupes.	86
Figure IV.6	Répartition du nombre de failles pour une longueur donnée, mesurée sur l'interprétation structurale des images Landsat, en fonction de son orientation.	87
Figure IV.7	Histogramme du nombre de failles en fonction de leur longueur [d'après Cardon, 1992]. Les failles sont mesurées dans le secteur de Bogoria, à partir de l'interprétation structurale des images SPOT.	88
Figure IV.8	Diagramme du nombre cumulé de faille pour une longueur donnée. Les failles sont mesurées sur l'interprétation structurale des images Landsat. La distribution est calculée pour chaque famille de failles, distinguée selon sa direction moyenne	89
Figure IV.9	Principe de l'estimation de l'extension à partir de l'identification des failles sur les images SPOT.	90
Figure IV.10	Valeurs des quantités d'extension associées aux failles interceptant chaque coupe transverse au rift. Ces coupes sont construites sur l'interprétation structurale des images SPOT du secteur de Bogoria.	91
Figure IV.11	Evolution longitudinale de la longueur cumulée des failles et du nombre de failles par coupe, dans le secteur de Bogoria, depuis le bassin de Bogoria-Baringo (coupe 1) en direction du bassin de Nakuru-Naivasha (coupe 16).	92
Figure IV.12	Interprétation structurale simplifiée du secteur étudié et densité de fracturation associée. La densité est obtenue respectivement à partir d'un carré de (a) 3,75 km, (b) 7,5 km et (c) 15 km de côté.	93
Figure IV.13	Principe de mesure de la dimension fractale sur le réseau de failles du secteur du Gregory Rift. La jauge utilisée (carré) est déplacée sur la totalité de l'image du réseau et la longueur cumulée calculée pour chaque position de la jauge. Ce travail est effectué pour plusieurs tailles de jauge.	95
Figure IV.14	Résultats de la mesure de la dimension fractale sur le Gregory Rift. Les losanges noirs représentent le logarithme de la longueur cumulée moyenne obtenue pour une taille donnée de la jauge. La droite de régression est calculée à partir de ces points.	96
Figure IV.15	a- Localisation des coupes le long du Gregory Rift; b- Dimension fractale calculée sur chaque coupe d'après Vidal et al [1993].	97
Figure IV.16	a- Schéma interprétatif de la géométrie de la fracturation du Gregory Rift à partir de l'étude du secteur de Bogoria. b- Segmentation longitudinale du rift en bassins et zones d'accommodation.	98
Figure V.1	a- Extrait de la scène Landsat TM 166-51 couvrant l'ensemble de la zone déformée analysée dans le secteur d'Umm Shatt. Le cadre correspond au secteur présenté en b; b- Identification d'un horizon-repère en amont d'un bloc basculé (flèches), par sa signature spectrale sur les images multibandes Landsat TM; c- Identification de l'horizon-repère sur le terrain (flèches), dans l'escarpement de faille en amont du même bloc basculé.	105
Figure V.2	Identification de l'horizon-repère (flèches) dans les séries du Jurassique sur une vue perspective du secteur de Ba'tays.	106
Figure V.3	Incertitudes liées au tracé du contour des blocs basculés sur les images. a- Image en carte de blocs basculés; b- Visualisation de ces blocs en coupe.	107
Figure V.4	Contours des blocs basculés définis à partir du couple d'images SPOT 146-324 focalisé sur le secteur de Umm Shatt.	108
Figure V.5	Contours des blocs basculés définis à partir du couple d'images SPOT 149-323, sur le secteur de Ba'tays.	109
Figure V.6	Visualisation des indicateurs de pendage sur une vue perspective. Quelques-uns des indicateurs sont soulignés par des flèches. a- secteur de Umm Shatt, b- secteur de Ba'tays.	110
Figure V.7	Caractéristiques des images utilisées pour le calcul des MNT dans les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays.	111
Figure V.8	Localisation des extraits réalisés sur les MNT : a- Secteur de Umm Shatt, b- Secteur de Ba'tays.	112
Figure V.9	Principe de mesure des marqueurs géologiques sur les vues perspectives. Les coordonnées des points qui constituent le marqueur "dos" (étoiles) ou le marqueur "falaise" (croix) sont mesurées dans le repère XYZ.	113
Figure V.10	Principe géométrique de détermination de l'orientation des marqueurs géologiques, à partir des coefficients de l'équation du plan qui les caractérisent. L'axe hy correspond au Nord géographique, d à la direction et p au pendage du plan.	114

Figure V.11	Comparaison de l'orientation des plans mesurés sur les vues perspectives et sur le terrain. a- Secteur de Umm Shatt, b- Secteur de Ba'tays	115
Figure V.12	Diagramme du nombre de points utilisés pour la régression plane en fonction de l'erreur d'estimation. a- secteur de Ba'tays, b- comparaison des deux secteurs.	116
Figure V.13	Diagramme de l'erreur d'estimation lors de la régression plane, calculée sur les coordonnées des marqueurs, en fonction du pendage obtenu. a- Secteur de Umm Shatt; b- Secteur de Ba'tays.	117
Figure V.14	Localisation des marqueurs géologiques mesurés dans le secteur de Ba'tays et pendages associés. a- Répartition des pendages mesurés; b- Répartition de l'erreur d'estimation associée à ces pendages.	119
Figure V.15	Coupe schématique montrant le principe d'obtention du modèle PLAN. Pour chaque bloc (1,2 ou 3), un pendage est choisi (marqueur "dos") puis reporté à l'altitude du marqueur "falaise".	121
Figure V.16	Modélisation numérique du secteur de Umm Shatt (vues perspectives depuis le Nord-Est et depuis le Sud-Ouest). Seules les surfaces de blocs sont représentées. Le pas de la grille est de 100 m.	122
Figure V.17	Colonne stratigraphique établie à partir de mesures sur le MNT du secteur de Ba'tays.	123
Figure V.18	Principe de calage des marqueurs géologiques sur l'altitude de l'horizon-repère, dans le cas du modèle FLEXURÉ. La coupe présentée est construite d'après la figure III.15.	124
Figure V.19	Modélisation numérique du secteur de Ba'tays (vues perspectives depuis le Nord-Ouest et le Sud-Est). Seules les surfaces flexurées sont représentées. Le pas de la grille est de 300 m.	125
Figure V.20	Influence de la géométrie de la faille sur la définition du contour des blocs et le choix du modèle. Cette coupe schématique est construite d'après celle réalisée dans le secteur de Ba'tays (figure III.15).	126
Figure V.21	Principe d'établissement de la carte de pendages des failles, dans le secteur de Umm Shatt, à partir du modèle plan de blocs basculés.	127
Figure V.22	Analyse des pendages des failles dans le secteur de Umm Shatt. a- Carte des pendages des failles (failles normales et décrochements). Les blocs basculés sont représentés en noir; b- Stéréogramme (canvas de Schmidt). Les cercles représentent les pôles des plans.	128
Figure V.23	Principe d'ajustage des triangles entre eux d'après Gratier et Guillier [1993]	131
Figure V.24	Influence du nombre d'itérations sur le dépliage du bloc 203. a- Evolution du facteur F en fonction du nombre d'itérations; b- Cartographie des erreurs inter-sommets associées au dépliage; c- Variations de surface du bloc déplié en fonction du nombre d'itération.	132
Figure V.25	Indices d'erreur de dépliage pour les blocs du secteur de Ba'tays	133
Figure V.26	Résultats du dépliage du bloc 202. a- Cartographie de la surface dépliée et localisation de la zone d'erreur; b- Cartographie des erreurs inter-sommets.	134
Figure V.27	Résultats du calcul du dépliage de la surface plane. a- Variation de F en fonction du nombre d'itérations; b- Cartographie de la surface avant et après dépliage; c- Cartographie de l'erreur inter-sommets associée au dépliage.	135
Figure V.28	Surfaces initiales, utilisées pour la comparaison des deux modèles. a- modèle PLAN, b- modèle FLEXURÉ	136
Figure V.29	Analyse des variations de surface au cours de la restauration d'un même bloc construit à partir des modèles PLAN et FLEXURÉ.	137
Figure V.30	a- Localisation des coupes sériées sur le bloc 202 et des mesures de terrain sur ce bloc; b- Comparaison en coupe du modèle plan et du modèle flexuré. Le modèle plan est figuré en traits pointillés.	138
Figure V.31	Référentiels fixes choisis pour l'ajustement des blocs des secteurs de Umm Shatt et de Ba'tays. Le rapport de taille entre les deux secteurs d'étude est respecté.	140
Figure V.32	Trajectoires de déplacement associées au débasculement de chaque bloc pour le modèle PLAN (secteur de Umm Shatt). L'équidistance des courbes de niveaux est de 100 m.	141
Figure V.33	Trajectoires de déplacement associées au dépliage de chaque bloc du secteur de Ba'tays. L'équidistance des courbes de niveaux est de 100 m.	142
Figure V.34	Ajustement des blocs du secteur de Umm Shatt. a- Ajustement réalisé à l'aide des trajectoires de débasculement; b- Ajustement réalisé à partir de la forme des blocs.	143
Figure V.35	Ajustement des blocs dépliés du secteur de Ba'tays. a- Ajustement des blocs à partir des trajectoires de dépliage; b- Ajustement selon la forme des blocs.	144
Figure V.36	Calcul de l'incertitude sur la valeur de l'extension, en fonction du contour choisi pour les blocs basculés.	146
Figure V.37	Résultats du calcul de l'extension dans le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement réalisé selon la forme des blocs; b- Ajustement réalisé selon les trajectoires de débasculement.	147

Figure V.38	Résultats du calcul de l'extension dans le secteur de Ba'tays. a- Ajustement réalisé selon la forme des blocs; b- Ajustement réalisé selon les trajectoires de dépliage.	148
Figure V.39	Erreurs associées au dessin des blocs dans le secteur de Ba'tays.	148
Figure V.40	Principe de l'identification de chaque bloc dans le logiciel IslandDraw, à partir des niveaux de gris affectés à chaque bloc.	151
Figure V.41	Principe de la superposition des configurations initiale et finale pour le calcul des déplacements 2D sur l'ensemble de la zone déformée.	152
Figure V.42	Champs de déplacements sur le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des seules trajectoires de débasculement; b- Ajustement réalisé selon la forme des blocs.	153
Figure V.43	Principe de superposition des deux configurations et champs de déplacements associés sur le secteur de Umm Shatt. a- Tracé obtenu pour les deux configurations (état initial et état final) superposées par rapport au barycentre du bloc 6; b- Tracé obtenu pour une superposition par rapport au barycentre du bloc 12.	155
Figure V.44	Variation du déplacement cumulé sur l'ensemble de la zone étudiée, en fonction de l'angle de rotation entre les deux configurations (état initial et état final), au cours de leur superposition.	157
Figure V.45	Cartographie des déplacements 2D sur le secteur de Umm Shatt pour la superposition des deux configurations obtenue avec un déplacement cumulé minimum (barycentre du bloc 6 fixé).	158
Figure V.46	a- Valeurs des rotations relatives des blocs du secteur de Umm Shatt; b- Représentation des rotations autour d'axes verticaux sur les blocs basculés. Le bloc 7 est considéré comme fixe au cours du calcul. Les rotations sont choisies positives, selon le sens trigonométrique.	160
Figure V.47	Cartographie des champs de déplacements 2D du secteur de Ba'tays. a- Ajustement des blocs selon les trajectoires de dépliage; b- Ajustement des blocs selon leur forme.	161
Figure V.48	Limites du calcul des champs 3D sur le secteur de Umm Shatt, à partir des données disponibles (points de contour des blocs).	162
Figure V.49	Principe de calcul de points homologues pour le calcul des champs 3D. Un marqueur homologue est positionné entre les limites des blocs dans l'état initial (1), puis sa projection est calculée sur chacun des blocs adjacents (2). Enfin, la position de ces marqueurs est déterminée dans l'état initial (3).	164
Figure V.50	Cartographie des déplacements 3D du secteur de Umm Shatt et schémas interprétatifs. a- Ajustement utilisant les trajectoires de débasculement; b- Ajustement à partir de la forme des blocs.	165
Figure V.51	Stéréogramme des plans de failles et des stries théoriques calculés à partir des déplacements 3D dans le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des trajectoires de débasculement; b- Ajustement selon la forme des blocs.	166
Figure V.52	Résultats de l'application du programme d'inversion de données aux stries calculées à partir du modèle du secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des trajectoires de débasculement; b- Ajustement intégrant l'ensemble des données.	166
Figure V.53	Apports du calcul des champs de déplacements	167
Figure VI.1	Interprétation locale de la déformation extensive dans les deux secteurs étudiés sur la marge sud du Yémen. a- Secteur de Umm Shatt; b- Secteur de Ba'tays.	172
Figure VI.2	Modèle de déformation de la marge sud du Yémen à l'échelle du point triple. a- Déformation de la marge ante-Miocène; b- Déformation de la marge au Miocène moyen; c- Déformation interne du bloc Sud-Est.	174

I

INTRODUCTION

I Introduction

Lors des premiers stades de fracturation de la lithosphère ou des événements tectoniques qui précèdent l'océanisation, la déformation extensive se localise dans des zones étroites, de 100 km de large environ, qui s'allongent sur plusieurs milliers de kilomètres. Cette déformation se manifeste par une activité tectonique et magmatique importante. Les données utilisées pour la compréhension de la déformation de ces zones sont variées. Les données géologiques renseignent sur la géométrie et cinématique des déformations, à l'échelle régionale ou locale. Les données géophysiques permettent de contraindre la géométrie des structures en profondeur (Bally et al, 1981; Wernicke et Burchfield, 1982; Jackson et McKenzie, 1983) et la nature des interfaces mécaniques ou thermiques (LePichon et al, 1982; Brun et Choukroune, 1983; Chen et Molnar, 1983; Davy et Cobbold, 1988). Enfin, l'analyse du magmatisme associé aux zones déformées permet de compléter les données concernant sur la répartition et la chronologie des événements tectoniques par rapport aux événements magmatiques [White et McKenzie, 1989].

Ces données permettent d'établir plusieurs modèles expliquant les mécanismes de l'extension. Le modèle de McKenzie [1978] correspond à une déformation en "pure shear" dans lequel la lithosphère s'amincit de façon homogène. Wernicke [1985] propose quant à lui un modèle d'extension basé sur une déformation en "simple shear", impliquant un déplacement important le long d'une faille de détachement. Ces deux modèles constituent des cas extrêmes dans la modélisation de la déformation extensive crustale [Brun et Choukroune, 1983; Coward, 1986] mais rendent compte des mouvements horizontaux (failles, décrochements) et verticaux (subsidence par exemple) qui se produisent dans les zones déformées, ainsi que des conditions thermiques qui accompagnent l'extension. Les conditions thermodynamiques lors de l'extension permettent la fusion de la lithosphère, décrite par les données géochimiques, et l'établissement d'une activité volcanique. Les modèles de rifting actif ou rifting passif [Sengör et Burke, 1978; Turcotte et Emeryman, 1983] permettent d'expliquer les manifestations volcaniques associées à l'extension.

L'analyse de la géométrie et de la distribution des structures extensives en carte, de leur chronologie par rapport aux événements magmatiques et de leur cinématique, permet de contraindre ces différents modèles. La déformation extensive s'exprime, en surface, par la présence de failles et de décrochements. L'analyse de ces structures à l'aide de modèles analogiques [Faugères et Brun, 1984] permet d'envisager la déformation à l'échelle lithosphérique. Les études réalisées mettent en évidence l'asymétrie des rifts [Allemand, 1988], la répartition de la déformation extensive en domaines séparés par des zones de transfert [Gapais et al, 1991; Tron et Brun, 1991; Souriot, 1992]. Elles montrent que la déformation des modèles en surface est contrôlée par les paramètres rhéologiques utilisés au cours de ces modèles [Faugères, 1985; Allemand et al, 1989; Davy et Cobbold, 1988; Beslier, 1991]. Ces paramètres sont imposés par le comportement mécanique de la lithosphère [Davy et Cobbold, 1988], et les résultats obtenus indiquent donc que la description de la géométrie des structures et de leur distribution, à la sur-

face des continents, contribue à la compréhension des mécanismes de la déformation extensive à l'échelle lithosphérique.

L'objectif de cette thèse est de quantifier la déformation extensive à l'aide d'images satellitaires et de décrire les champs de déplacements associés. L'échelle d'observation choisie pour les objets géologiques, permet d'envisager une analyse de la déformation finie de ces objets à l'échelle crustale. Sur le plan méthodologique, l'utilisation de ces données pour la description 2D de la déformation vise à développer une approche quantitative des structures tectoniques visibles sur les images.

La quantification de la déformation extensive n'est possible que si l'état initial ante-déformation et l'état final déformé sont parfaitement connus. Dans le cas de la déformation continentale extensive, des horizons géologiques appartenant à des systèmes de blocs basculés séparés par des failles normales et des décrochements caractérisent l'état final. La géométrie précise de ces marqueurs géologiques dans l'état final est fournie par l'interprétation des images satellitaires et par l'analyse structurale sur le terrain des zones déformées. Cette dernière permet de décrire les failles par leur orientation, mais également les mouvements sur ces failles et leur chronologie [Petit et al, 1983]. La reconstitution des tenseurs de contraintes associés aux mouvements sur les failles, à partir de méthodes d'inversion [Arthaud, 1969; Carey, 1979; Etchecopar et al, 1981; Angelier, 1983; Michael, 1984; Gephart et Forsyth, 1984] fournit la direction moyenne de l'extension et complète la description de la zone déformée.

La reconstitution de l'état initial des marqueurs déformés est plus complexe. Elle est basée sur les techniques d'équilibrage des structures, soit en coupes [Dhalstrom, 1969; Hossack, 1979; Ménard, 1987; Mugnier et al, 1987; Ramsay et Huber, 1987], soit en carte [Percevault et Cobbold, 1982; Gratier et al, 1989; DePaor, 1988; Guillier, 1991; Rouby et al, 1993]. Pour la construction de coupes équilibrées, l'hypothèse majeure qui est faite, considère que la déformation se fait à volume constant, ce qui implique une conservation des surfaces ou des longueurs de couches dans le plan de coupe [Hossack, 1979; Ramsay et Huber, 1987]. De plus, ce plan de coupe doit être perpendiculaire à une direction de non-déformation (déformation plane). L'intégration de plusieurs coupes équilibrées permet de restaurer l'état initial de structures en carte [DePaor, 1988; Moretti et Larrère, 1989], mais la limitation majeure de ces techniques réside dans le fait qu'elles traitent la déformation en deux dimensions seulement.

Les techniques de restauration des structures s'appuient sur la décomposition de la zone déformée de façon hétérogène, en éléments finis à déformation supposée homogène et continue [Cobbold, 1979; Schwerdtner, 1977; Oertel et Ernst, 1978; Percevault et Cobbold, 1982; Gratier et al, 1989]. Chaque élément ainsi distingué est alors ajusté par rapport à ses voisins, pour reconstituer l'état ante-déformation de la zone déformée. Cet ajustement s'effectue en tenant compte des mesures de déformation finie et des trajectoires de déformation. Appliquées à l'échelle régionale [Percevault et Cobbold, 1982; Schultz-Ela, 1988; Gratier et al, 1989], ces méthodes permettent de reconstituer les déplacements associés aux déformations. Cependant, ces méthodes sont appliquées pour la plupart à des domaines en déformation continue et considèrent la part de déformation discontinue comme négligeable.

D'autres méthodes de restauration, de développement plus récent, tiennent compte à la fois de la déformation continue et discontinue [Barr, 1985; Gratier, 1988; Gratier et al, 1991; Guillier, 1991], à partir de la géométrie des marqueurs géologiques déformés. Le principe de ces méthodes est de modéliser les marqueurs déformés de façon continue à partir de méthodes

d'éléments finis, puis de restaurer ces surfaces et enfin de les ajuster le long des discontinuités qui les séparent [Gratier, 1988; Gratier et al, 1991; Guillier, 1991; Gratier et Guillier, 1993]. Les données utilisées pour modéliser la géométrie des marqueurs géologiques correspondent soit à des coupes sériées, soit à des données de sismique 3D et permettent la quantification des déplacements en trois dimensions.

Pour toutes ces techniques de restauration (2D ou 3D), l'ajustement des surfaces restaurées entre elles constitue une étape cruciale. Elle est réalisée manuellement [Oertel et Ernst, 1978; Gratier et al, 1989; Guillier, 1991; Gratier et Guillier, 1993] ou de façon automatique [Cobbold et Percevault, 1983; Audibert, 1990; Rouby et al, 1993], en tenant compte des mesures de déformation finie et/ou des trajectoires de déformation. Cette étape permet de contraindre les conditions aux limites des éléments, et de minimiser les vides et les recouvrements entre les divers éléments qui composent la zone étudiée.

La quantification de l'extension et des déplacements associés envisagée au cours de ce travail, est basée sur l'utilisation d'une de ces méthodes de restauration. La modélisation des blocs basculés est réalisée à partir de données topographiques. Ces données numériques se présentent sous la forme de modèles numériques de terrain (MNT) calculés par auto-corrélation à partir d'images satellitaires [Mémier, 1991].

La quantification de la déformation continentale est envisagée sur une portion du rift Est-africain située au Kenya (Gregory Rift), ainsi que sur la marge continentale située à l'extrémité Sud de la péninsule arabe (Yémen), et à proximité de la jonction de trois rifts. Ce travail s'inscrit dans le cadre plus général d'une étude des processus magmatiques [Chazot et al, 1991; Chazot, 1993] et de la cinématique des déformations extensives au Yémen, en bordure de ce point triple [Huchon et al, 1991; Jestin et Huchon, 1992].

La démarche adoptée pour quantifier la déformation consiste dans un premier temps à définir la géométrie des zones déformées. Ceci est réalisé par l'interprétation d'images satellitaires et l'utilisation de données structurales mesurées sur le terrain. Cette étape permet de décrire l'objet géologique étudié (Gregory Rift ou marge sud du Yémen) et de valider la méthode de quantification de paramètres structuraux à partir des images.

Les résultats obtenus sont utilisés pour élaborer et contraindre un modèle des zones déformées, à partir des données topographiques. Après restauration des structures dans leur état de non-déformation, ce modèle permet de quantifier l'extension dans les zones déformées. La reconstitution de l'état initial ante-déformation et sa comparaison avec l'état final déformé conduisent au tracé des déplacements associés à la déformation extensive.

Le manuscrit se compose de 6 chapitres, et s'articule de la façon suivante.

Dans le chapitre 2, les méthodes permettant de traitement des données utilisées au cours de ce travail sont présentées. Le principe de traitement des images satellitaires est brièvement expliqué en s'appuyant sur quelques exemples. La présentation des données topographiques permet de détailler tous les traitements réalisés au cours de ce travail, et préalables à l'utilisation des modèles numériques de terrain (MNT). Enfin, la méthode d'inversion, utilisée pour reconstituer les directions d'extension à partir des mesures de failles réalisées sur le terrain (au Yémen), est présentée. Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec d'autres méthodes d'inversion.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation générale des objets géologiques retenus pour l'analyse de la déformation continentale extensive. Le cadre géologique est d'abord présenté à

partir des travaux antérieurs sur le Gregory Rift (Kenya) et sur le Yémen. Enfin, une analyse structurale détaillée complète les données disponibles sur la marge Sud du Yémen, à partir de l'utilisation combinée d'images satellitaires et de données microstructurales acquises au cours d'une mission de terrain.

Le chapitre 4 présente l'analyse géométrique de la fracturation sur le Gregory Rift. La quantification de la déformation est abordée à partir de l'interprétation structurale des images, de la quantification des paramètres caractérisant les failles (rejet, longueur, orientation) ou le réseau de failles (espacement des failles, quantité d'extension, densité de répartition, dimension fractale du réseau).

Le chapitre 5 concerne la quantification de l'extension et des champs de déplacements associés, sur la marge sud du Yémen. La modélisation des zones déformées est élaborée à partir des images satellitaires et des données topographiques. L'état ante-déformation est reconstitué après restauration des structures déformées. Enfin, l'extension et les champs de déplacements associés sont calculés.

En conclusion, le chapitre 6 reprend l'ensemble des résultats obtenus et permet de discuter de leurs implications géodynamiques (au Yémen essentiellement), et de leurs limites méthodologiques.

II

BASES METHODOLOGIQUES

II Bases méthodologiques

Une grande partie des données utilisées au cours de ce travail est constituée par des données numériques correspondant à des images satellitaires ou des modèles numériques de terrain (MNT). D'autres données, également sous forme numérique, correspondent aux orientations des failles mesurées sur le terrain (direction, pendage). L'objet de ce chapitre est de présenter succinctement les techniques utilisées pour la manipulation et le traitement de ces données. Après la définition de quelques termes importants concernant chaque technique employée, seuls quelques traitements, appliqués sur les objets étudiés au cours de cette thèse, sont présentés.

Compte-tenu du volume de données disponible et de la taille des calculs liés aux traitements de ces données (images satellitaires et MNT essentiellement), des équipements informatiques performants de type "station de travail" sont nécessaires pour leur manipulation. Les données numériques ont été traitées au laboratoire des Sciences de la Terre de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon qui disposait alors des équipements suivants :

- une station de travail SUN 4/330 GXP (accélérateur graphique et carte 32bits) avec écran couleur, 24 Megabytes de mémoire et 2.7 Gigabytes de capacité disque. Cette station sert à la fois de poste de travail et de serveur de logiciels et de fichiers pour les autres machines. Elle est associée à un dérouleur de bandes magnétiques.
- une station de travail SUN Sparc1 8bits avec écran couleur, 8 Mégabytes de mémoire.
- deux stations SUN SLC "diskless" avec écran monochrome.
- un CYBER930 associé à un dérouleur de bandes magnétiques.

L'évolution du niveau de performance des machines du marché actuel a nécessité l'acquisition de nouvelles stations de travail SUN, fonctionnant sous Solaris 2 :

- un SparcServer disposant de 48 Mb de mémoire.
- une station de travail SUN SPARC10 avec 80 Mb de mémoire vive dédiée au traitement d'images avec une carte graphique et un écran 24 bits.
- une station de travail LX, 48 Mb de mémoire vive, écran 8 bits et lecteur de CDROM.
- deux stations SUN SLC "diskless" avec écran monochrome,
- une capacité totale de stockage de 3 Gigabytes, ainsi qu'un dérouleur de bandes magnétiques.

L'ensemble de ces machines est connecté au réseau interne de l'E.N.S. (via Ethernet) et au réseau Internet ce qui permet notamment l'accès au calculateur CYBER990 du centre inter-universitaire de calcul de Grenoble, qui dispose d'une imprimante Versatec à jet d'encre permettant la restitution d'images satellitaires sur un support papier de grande dimension (1,50 m x 1,50 m et plus). Le laboratoire a également accès, via le réseau, à une imprimante couleur Canon CLC300 disposant d'une Unité de Traitement d'Images Postscript (interpréteur 8bits) permettant la restitution d'images aux formats A4 et A3 en 400 dpi.

Le laboratoire possède une série de logiciels sous licences, "domaine public" ou développés au laboratoire pour des besoins plus spécifiques, et destinés :

- à la manipulation d'images satellitaires brutes (programmes C de lecture de bandes, de windowing, de lecture d'en-tête d'images, de construction d'histogrammes ...),
- au traitement de ces images (IMAGE, TRAITIM),
- à leur visualisation sous 8 ou 24 bits (XV, XLOADIMAGE), ou à partir de fichiers au format Postscript (Ghostview, Pageview),
- à la manipulation et la visualisation de données numériques à trois dimensions (GMT, XVUE3D),
- à la restitution des images ou des diverses données traitées, sous divers formats, notamment au format Postscript (PBMPLUS).

De plus de nombreux programmes de formattage de données ou de calculs relatifs aux images satellitaires ont été élaborés en C au cours de ce travail. Ces programmes sont référencés en annexe (Annexe 1) et seront rappelés au moment de leur utilisation au cours de ce travail, en caractères italiques, pour les différencier des autres logiciels du laboratoire mentionnés en lettres capitales.

II.1 Imagerie satellitaire

La plupart des informations présentées dans ce chapitre sont issues de divers livres concernant le traitement des images, de rapports techniques sur les caractéristiques des satellites et de publications scientifiques concernant les applications de la télédétection à la géologie. Pour clarifier la présentation, les sources d'informations sont précisées séparément ci-dessous, plutôt que sous forme de rappels dans le texte.

Les informations concernant la manipulation et le traitement des images sont issues de plusieurs articles ou chapitres des ouvrages suivants :

- Digital image processing, W.K. Pratt [1978],
- Terrain analysis and remote sensing, J.R. Townshend [1981],
- Manual of remote sensing, American Society of Photogrammetry [1983],
- Remote sensing digital image analysis, J.A. Richards [1986],
- Digital image processing in remote sensing, J.P. Müller [1988],
- Précis d'analyse d'images, M. Coster, J.L. Chermant [1989],
- Physical principles of remote sensing, W.G. Rees [1990].

Des rapports techniques de Spot Image Diffusion, ont également été utilisés pour compléter les caractéristiques techniques du satellite SPOT.

Enfin, on pourra trouver de nombreux exemples d'applications des techniques de l'imagerie :

- à l'interprétation des signatures spectrales des roches [Hunt et al, 1973; Hunt, 1977; Rowan et al, 1977; Rothery, 1987; Bardinnet et al, 1988c; Tréfois, 1988],
- à la cartographie thématique [Abrams et al, 1988; Bardinnet, 1988a; Bardinnet et al, 1988b; Chamignon et al, 1990; Dedieu et al, 1992],
- à l'identification des structures géologiques fragiles ou ductiles [Chorowicz, 1980; Vidal, 1985; Berhe et Rothery, 1986; Chorowicz et al, 1987; Crane et Bonatti, 1987; Vidal, 1987; Chorowicz et Vidal, 1989; Peltzer et al, 1989; Bénard et al, 1990; Rolet et Yésou, 1990; Woldegrabriel et al, 1990; Bellier et al, 1991; Kronberg, 1991a; Kronberg, 1991b; Berger et al, 1992; Delay et al, 1992; Souriot, 1992; Souriot et Brun, 1992; Chorowicz et Deffontaines, 1993; Martelat, 1993],

- à d'autres applications telles la reconnaissance de forme [Schaaf et Vansteelant, 1988; Launeau et al, 1990], l'utilisation des propriétés stéréoscopiques des images ou la quantification de paramètres géométriques directement sur les images [Peltzer et al, 1989; Berger et al, 1992; Crippen, 1992; Souriot, 1992; Souriot et Brun, 1992; Reynes et al, 1993; Thoué et Vidal, 1993].

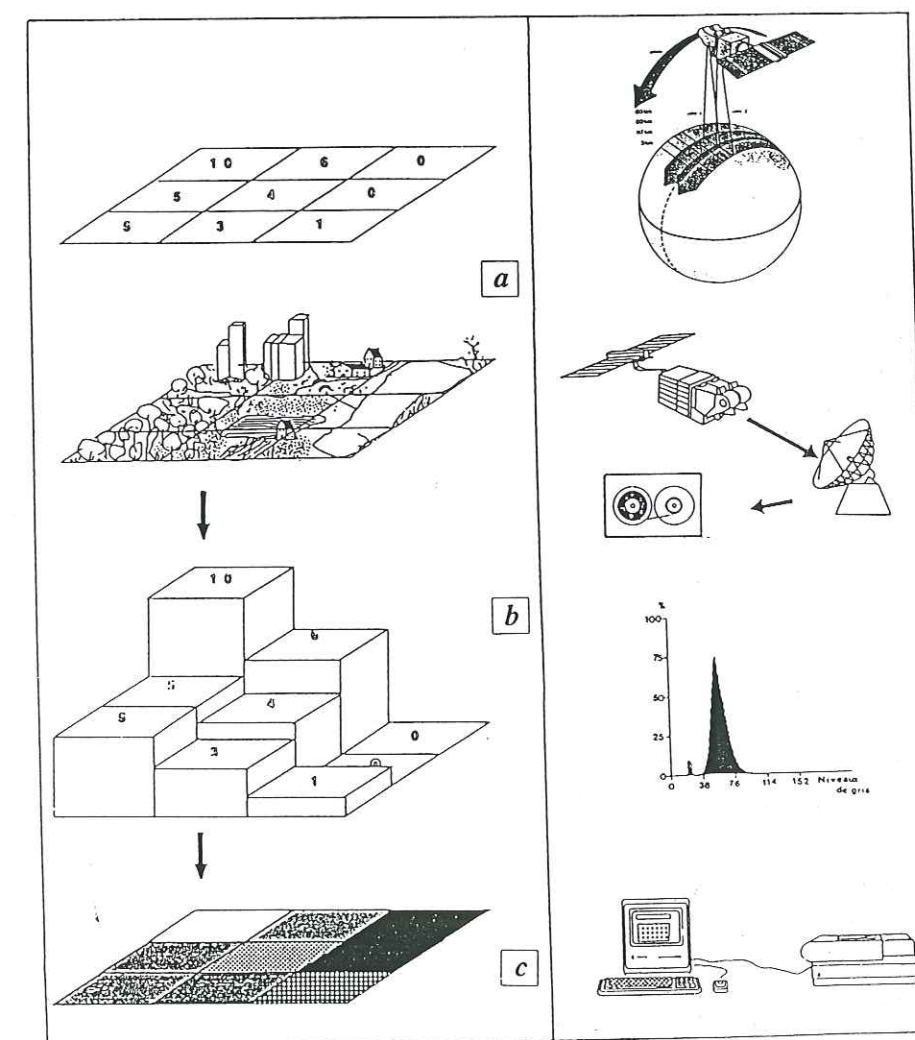
II.1.1 Caractéristiques des images utilisées

1.1.1 Quelques définitions

Le principe d'obtention d'une image satellitaire est basé sur l'enregistrement des rayonnements électro-magnétiques renvoyés par les objets éclairés par le soleil. Le satellite en orbite autour de la Terre porte des capteurs qui vont enregistrer sous forme numérique l'amplitude du rayonnement électro-magnétique reçu dans une longueur d'onde donnée, depuis une surface donnée, et sous un angle de prise de vue donné.

Selon les caractéristiques techniques des satellites, le rayonnement électro-magnétique renvoyé par les objets à la surface de la Terre est enregistré dans plusieurs bandes du spectre électro-magnétique de largeur variable. On définit la *résolution au sol du satellite* qui correspond à la surface minimale sur laquelle est enregistré le rayonnement.

Figure II.1 Principe d'acquisition (a), de stockage (b) et de restitution (c) d'une image satellitaire. La colonne de gauche représente l'image, et la colonne de droite, les techniques d'acquisition.



Ainsi, le satellite Landsat TM (Thematic Mapper) mesure le rayonnement sur une surface au sol de 30 m de côté alors que le satellite SPOT peut, dans certains cas, le mesurer sur une surface de 10 m de côté. Ces surfaces sont représentées par un point sur l'image, appelé *pixel* pour "picture element" (figure II.1). C'est la juxtaposition de plusieurs de ces surfaces élémentaires qui permet d'obtenir des scènes ou images satellitaires.

L'amplitude du rayonnement dans une gamme de longueurs d'ondes donnée, mesurée et enregistrée par les capteurs du satellite, est codée sous forme numérique, en une valeur qui représente la *radiométrie* de chacun des pixels de l'image. Le codage se fait en général sur 8 bits et ce qui permet donc d'obtenir $2^8 = 256$ valeurs entières possibles, pour chaque pixel. Ces valeurs sont prises entre 0 et 255 et représentent les *niveaux de gris* de l'image. Les valeurs de radiométrie sont transmises sur Terre par le satellite lorsque celui-ci passe à la verticale d'une station réceptrice, ou à proximité d'un satellite-relais.

Si un satellite possède plusieurs capteurs permettant l'enregistrement de plusieurs gammes de longueurs d'ondes, on parle d'*images multispectrales* (ou multibandes). Chaque gamme de longueurs d'ondes enregistrée correspond alors à un *canal* de l'image satellitaire. Pour chaque canal, la radiométrie est codée sous la forme de niveaux de gris et c'est la combinaison des différents canaux qui permet d'obtenir une vision en *fausses couleurs* de l'image (par différence avec les couleurs "réelles" des objets). Si le satellite ne possède qu'un seul capteur, enregistrant les rayonnements électro-magnétiques dans une seule gamme de longueur d'ondes, en général très étendue dans le spectre visible, il produit alors des *images panchromatiques*.

1.1.2 Caractéristiques des satellites SPOT et Landsat

Le satellite Landsat

Il existe en fait plusieurs générations de satellites Landsat différentes. Le satellite Landsat TM lancé le 16 Juillet 1982 correspond à une évolution marquée des caractéristiques des satellites Landsat des générations précédentes. Son orbite autour de la Terre est *polaire, héliosynchrone*, d'altitude plus basse (705 km) par rapport à Landsat 1 (920 km). Il permet d'acquérir une couverture totale de la Terre en 16 jours, soit 233 révolutions de 98.9 minutes chacune avec une résolution au sol de 30 m, pour des scènes de 185 km de côté (pixel de 79 m par 56 m pour les satellites Landsat 1 et 2). Il est équipé de capteurs MSS (pour Multispectral Scanner), systèmes de miroirs oscillants latéralement pour l'enregistrement des rayonnements électro-magnétiques sur une ligne au sol. Il dispose également de capteurs TM (Thematic Mapper) pour un balayage latéral d'une ligne au sol, mais aussi, un enregistrement des données vers l'avant ou vers l'arrière de la marche du satellite, afin de disposer d'images stéréoscopiques. Cette dernière spécification n'est malheureusement pas fonctionnelle. Ces différents capteurs sont capables d'enregistrements dans les gammes de longueurs d'ondes suivantes:

- MSS1 $\rightarrow 0.5$ à $0.6 \mu\text{m}$
- MSS2 $\rightarrow 0.6$ à $0.7 \mu\text{m}$
- MSS3 $\rightarrow 0.7$ à $0.8 \mu\text{m}$
- MSS4 $\rightarrow 0.8$ à $1.1 \mu\text{m}$
- bande TM1 $\rightarrow 0.45$ à $0.52 \mu\text{m}$
- bande TM2 $\rightarrow 0.52$ à $0.60 \mu\text{m}$
- bande TM3 $\rightarrow 0.63$ à $0.69 \mu\text{m}$
- bande TM4 $\rightarrow 0.76$ à $0.90 \mu\text{m}$
- bande TM5 $\rightarrow 1.55$ à $1.75 \mu\text{m}$
- bande TM6 $\rightarrow 10.40$ à $12.50 \mu\text{m}$ (canal thermique, résolution au sol de 120 m)

- bande TM7 $\rightarrow 2.08$ à $2.35 \mu\text{m}$

Ce satellite et le satellite Landsat 5 lancé le 1er Mars 1984 peuvent transférer les données numériques sur Terre par l'intermédiaire de satellites-relais (TDRS pour Tracking and Data Relay Satellite).

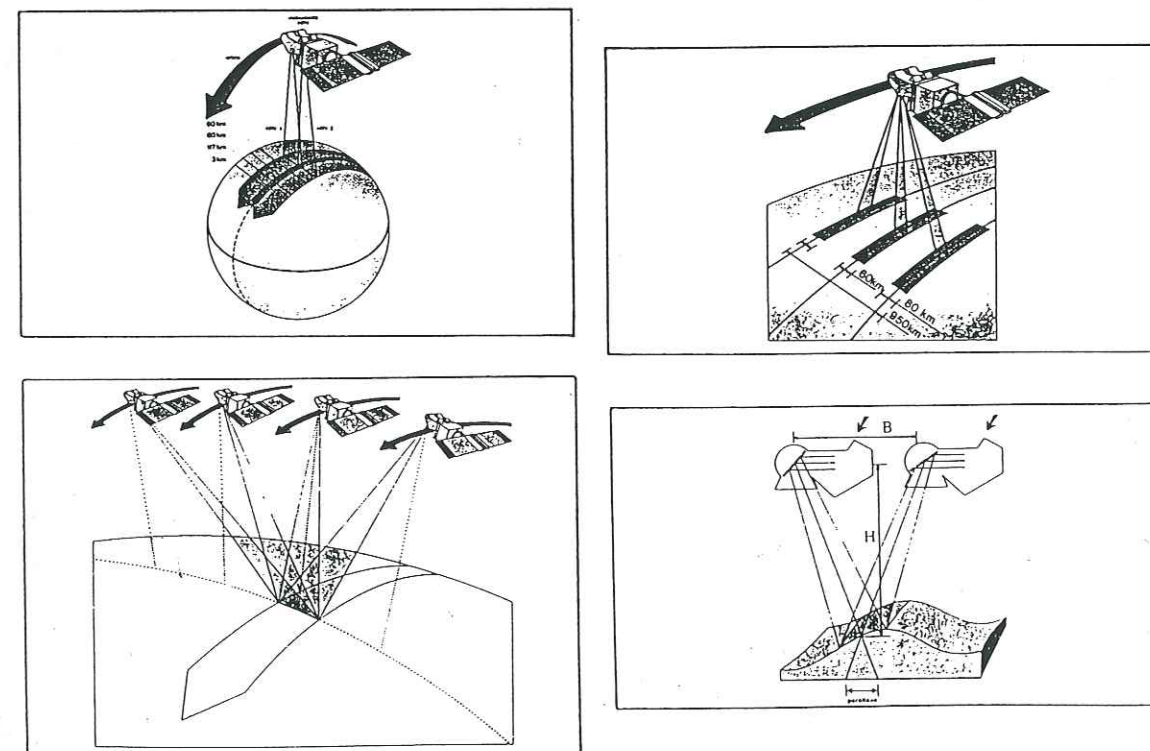
Le satellite SPOT

Le satellite SPOT (Satellite Probatoire d'Observation de la Terre), conçu par un consortium comprenant le CNES et Matra Espace, a été lancé le 22 Février 1986 par la fusée ARIANE. Il envoie sa première image de la Terre le 23 Février 1986. Son orbite est *polaire et héliosynchrone*. Elle se situe entre 818 et 838 km d'altitude. Le satellite possède une période de révolution de 1 h 42 min. et une périodicité de 26 jours, pendant laquelle il effectue 369 rotations autour de la Terre. Depuis, cette date, deux autres satellites, SPOT2 et SPOT3, ont été lancés respectivement le 22 Janvier 1990 et le 23 Septembre 1993. Ces deux satellites possèdent les mêmes caractéristiques techniques que SPOT1.

Le satellite SPOT est équipé de deux instruments HRV (High Resolution Visible) à détecteurs CCD (Charge Couple Device) ainsi qu'un télémètre. Ces appareils lui permettent d'opérer selon deux modes d'enregistrement des rayonnements:

- mode *multispectral* pour lequel les longueurs d'ondes du spectre électro-magnétique sont les suivantes :
 - bande XS1 $\rightarrow 0.50$ à $0.59 \mu\text{m}$
 - bande XS2 $\rightarrow 0.61$ à $0.68 \mu\text{m}$
 - bande XS3 $\rightarrow 0.79$ à $0.89 \mu\text{m}$
- mode *panchromatique* avec une seule bande passante de longueurs d'ondes comprises entre 0.51 et $0.73 \mu\text{m}$.

Figure II.2 Principe d'acquisition de couples stéréoscopiques avec le satellite SPOT [d'après SPOT Diffusion]. Cette figure illustre les possibilités de dépointage des capteurs du satellite SPOT, ainsi que le principe de calcul du rapport B/H pour une scène donnée.



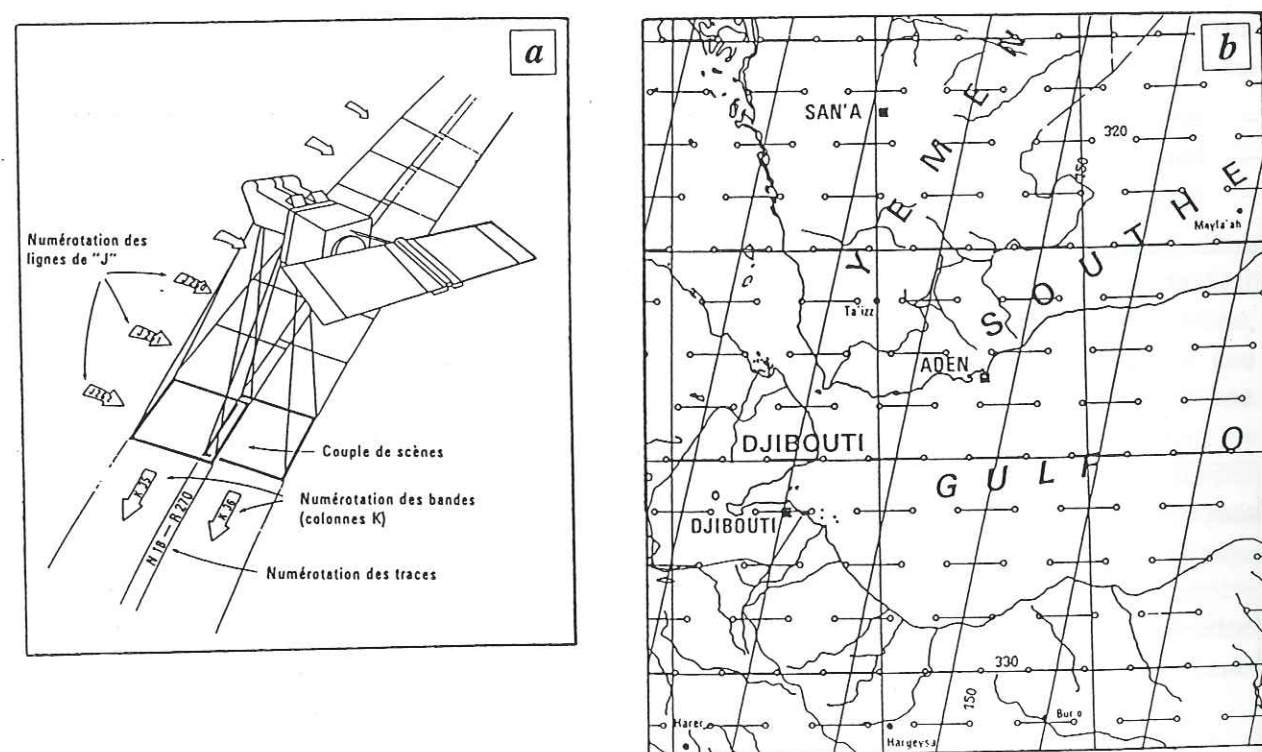
Le satellite balaie avec chacun de ses capteurs une surface au sol de 60 km, en visée verticale, avec un recouvrement de 3 km pour deux scènes adjacentes, soit une trace au sol, avec ces deux capteurs, de 117 km de large. Une particularité des capteurs du satellite est que ceux-ci sont orientables par pas successifs de 0.5°, de +27° à -27°, numérotés de 3 à 93. Ceci permet des visées obliques par rapport à la trace du satellite, par *dépointage* de l'un ou l'autre des capteurs. En combinant vues obliques et/ou vues verticales d'une même scène, un effet stéréoscopique est obtenu selon le principe illustré par la figure II.2.

Le système de repérage de chaque scène enregistrée par le satellite SPOT se fait de la façon suivante :

- repérage de la trace au sol du satellite,
- attribution à chaque scène des valeurs de référence J (lignes) et K (colonnes) auxquelles correspondent des coordonnées géographiques.

Ces divers paramètres sont reportés sur la Grille de Référence SPOT (GRS) qui couvre l'ensemble du globe et permet de localiser avec précision, les images acquises par le satellite (figure II.3).

Figure II.3 a- Principe de repérage des images SPOT sur la G.R.S.; b- Extrait de la G.R.S focalisé sur le Yémen. Chaque symbole rond représente le centre d'une scène [d'après SPOT Diffusion].



1.1.3 Format des données numériques

La juxtaposition sur une grille de tous les pixels de l'image, identifiés par leur niveau de gris et repérés par leur position en X et en Y, définit le format *raster* ou *raw*. En théorie, une image panchromatique du satellite SPOT sera contenue dans un fichier de données numériques de 6000 lignes par 6000 colonnes, dans lequel chaque valeur correspondant à un pixel sera codée sur 8 bits, soit un fichier de 36 Megabytes. En fait, pour la plupart des satellites, le nombre effectif de colonnes d'une image est plus important. Dans le cas du satellite SPOT par exemple, le nombre de colonne d'une image XS est de 5400, au lieu des 3000 enregistrées par le satellite. Cette

différence est liée aux corrections géométriques réalisées sur l'image, qui induisent une obliquité de la scène sur la trace au sol du satellite. Les causes de ces distorsions et les corrections apportées sont détaillées dans le paragraphe II.1.2. Le tableau II.4 illustre les tailles des fichiers de données numériques disponibles pour les satellites Landsat TM et SPOT.

Tableau II.4 Tableau comparatif des caractéristiques des images numériques des satellites Landsat TM et SPOT.

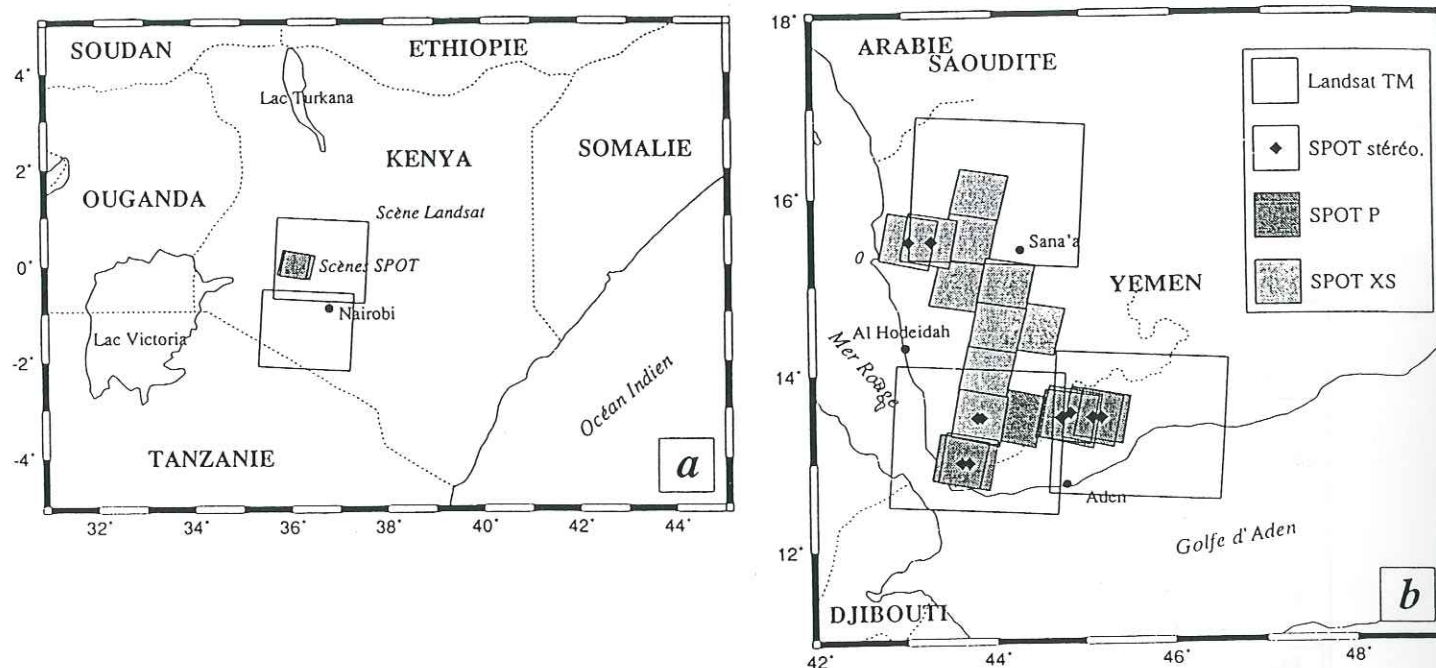
Satellite	LANDSAT 4		SPOT	
	MSS	TM	HRV - XS	HRV -PAN
Taille de la scène (lig x col)	2340 x 3240	5375 x 6468	3000 x 5400	6000 x 8640
Taille de l'information pour un canal (Mbytes)	5.5	28.9	9	36
Nb de canaux par image	5	7	3	1
Taille théorique du fichier-image (Mbytes)	27.5	202.5	27	36
Taille effective du fichier-image (Mbytes)	37.9	243.35	48.6	51.84

1.1.4 Images utilisées

- Les scènes 166-49, 166-51 et 165-51 du satellite Landsat TM ont été mises à notre disposition par la société Elf-Aquitaine. Ces scènes correspondent à des images multibandes sur 7 canaux.
- Les scènes 146-324, 149-323, 146-323, 145-318, 145-319, 145-320, 145-321, 147-321, 147-323, 148-323 du satellite SPOT ont été acquises grâce au financement de l'INSU sur un projet DBT. Elles correspondent à des images multibandes et panchromatiques. De plus, les images 146-323, 146-324, 148-323 et 149-323 ont été acquises par couples pour une utilisation en vision stéréoscopique.

Ces images sont focalisées sur la République du Yémen. D'autre part, un couple stéréoscopique d'images SPOT (scène 137-350) focalisé sur une portion du rift Est-africain (Kenya) a également servi au cours de cette étude (figure II.5).

Figure II.5 Localisation des images utilisées au cours de ce travail. a-Kenya; b-Yémen.



II.1.2 Manipulations des images numériques

L'enregistrement des rayonnements électro-magnétiques à partir d'un satellite en orbite autour de la Terre est complexe et de nombreuses distorsions affectent les données numériques recueillies. Ces distorsions sont corrigées avant l'utilisation et le traitement des images.

1.2.1 Corrections des images

Les sources de ces distorsions sont :

- la courbure de la surface terrestre,
- la rotation de la Terre pendant l'acquisition des données,
- les variations des paramètres orbitaux du satellite,
- les imperfections et dysfonctionnements des capteurs,
- la présence de l'atmosphère.

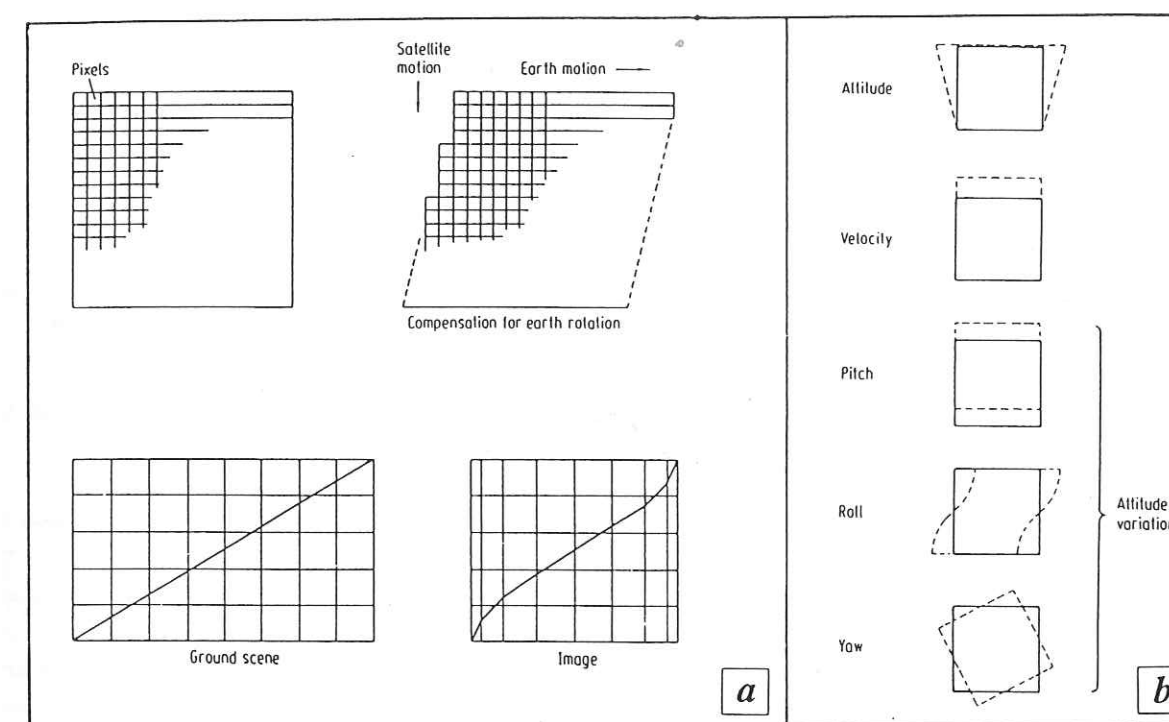
Il existe deux principaux types de distorsions :

- les erreurs au niveau de la radiométrie mesurée,
- les erreurs au niveau de la géométrie de l'image.

Les distorsions radiométriques sont causées par des facteurs externes (émission, absorption, diffusion dans l'atmosphère perturbant les rayonnements électro-magnétiques), ou des facteurs internes tels que les erreurs d'instrumentation ou de calibrage des capteurs du satellite. Ces erreurs sont en général corrigées dès la réception des données à l'aide de modèles mathématiques des principales sources de distorsions.

Les distorsions géométriques sont liées à la rotation de la Terre pendant l'acquisition des données, mais aussi, aux mouvements du satellite et à la variation de ses paramètres orbitaux, comme l'illustre la figure II.6.

Figure II.6 Effet de la rotation de la Terre et du mouvement du satellite au cours de l'acquisition des données [d'après Richards, 1986]. a- Distorsion de l'image du fait de la rotation de la Terre; b- Distorsion de l'image du fait des variations d'attitude du satellite.



Une autre erreur possible est liée au temps de balayage d'une ligne par un capteur du satellite. Par exemple, il faut 33 ms aux capteurs MSS du satellite Landsat pour enregistrer les données sur une ligne de 185 km de largeur. Mais, pendant ce court intervalle de temps, le satellite avance de 213 m. Ceci entraîne donc un décalage au sol entre le début et la fin de la ligne balayée par le capteur. Enfin, il se produit une distorsion panoramique, du fait de la courbure de la Terre et de l'angle de prise de vue (FOV pour "Field of View") de chaque image. En effet, la valeur de l'IFOV ("Instantaneous Field Of View") qui correspond à l'angle d'ouverture de la prise de vue pour les capteurs des satellites, est constante. Pour un angle de prise de vue donné (FOV), définissant ainsi la surface au sol d'une image, la surface au sol de chaque pixel enregistré par les capteurs va varier selon la position de ce pixel par rapport à la trace du satellite (c'est-à-dire par rapport au centre de la scène). La taille des pixels sera plus petite au centre de l'image que sur les bords, d'où un changement de la géométrie de l'image.

Ces distorsions géométriques se corrigent à l'aide de deux approches:

- soit une modélisation de la nature et de l'amplitude des sources de la distorsion,
- soit un calcul mathématique de la relation entre les coordonnées "image" d'un pixel et les coordonnées d'un point au sol qui lui correspond. Ceci conduit à un recalage de l'image par rééchantillonnages et interpolations successifs, à partir de cartes (coordonnées géographiques) ou de GCP (pour Ground Control Points).

Les images Landsat TM utilisées au cours de ce travail sont toutes corrigées de leurs erreurs radiométriques et géométriques, mais non-recalées. Cependant, l'angle entre le bord de chaque scène et le Nord géographique est connu (trace au sol du satellite), ce qui permet d'orienter les images correctement, comme leurs interprétations réalisées par la suite.

Pour le calcul des modèles numériques de terrain à partir de couples stéréoscopiques SPOT, les images ont été acquises au niveau 1A défini par SPOT Image [Spot Diffusion, 1989]. Pour

ce niveau, les corrections géométriques n'ont pas été effectuées. Ceci pose le problème de leur utilisation ultérieure lors de l'interprétation géologique des images. Le programme *nla2n1b.c* a été développé pour corriger géométriquement les images acquises. Il tient compte des paramètres orbitaux du satellite SPOT au moment de la prise de vue et fournit une image corrigée, au format *raw*.

1.2.2 Traitements des images

Définitions et traitements utilisés

Lors des traitements appliqués aux données numériques, on considère l'image comme un signal discret à deux dimensions, ou comme une matrice de pixels repérés par leurs coordonnées en ligne et colonne. Les opérations mathématiques appliquées modifient les valeurs de radiométrie de chaque pixel, dans le but de mettre en évidence certaines propriétés de l'image.

On distingue essentiellement 4 procédés :

1. **amélioration de la dynamique de l'image** en modifiant son contraste par des traitements radiométriques appropriés. La *dynamique* de l'image peut être représentée par la répartition des pixels qui la composent sur les niveaux de gris disponibles. On visualise ceci par l'histogramme du nombre de pixels en fonction du niveau de gris. On fait ainsi varier la distribution des pixels sur les 256 niveaux de gris en réalisant des opérations sur chacun des pixels et de façon indépendante d'un pixel à l'autre. On modifie ainsi l'allure de l'histogramme de répartition des pixels de plusieurs façons :
 - *égalisation* (ou normalisation): Ce traitement vise à linéariser l'histogramme cumulé de répartition des pixels.
 - *étalement*: Ce traitement consiste à étirer l'histogramme brut, pour que les pixels se répartissent sur le maximum de niveaux de gris. Ceci peut se faire de façon linéaire, logarithmique, exponentielle ou par parties.
 - *anamorphose*: Ce traitement corrige l'histogramme brut en lui faisant suivre une loi de répartition mathématique (exponentielle, gaussienne...) choisie par l'opérateur.
2. **analyse de l'information spatiale contenue dans l'image** par des traitements de voisinage, "géométriques", qui affectent une valeur de radiométrie à un pixel en fonction de celle des pixels qui l'entourent. Ces traitements correspondent à des filtres qui s'effectuent selon deux procédés :
 - traitement matriciel, si on considère l'image comme une matrice à I lignes et J colonnes. Dans ce cas, les traitements se réduisent à des convolutions entre la matrice IMAGE et la matrice FILTRE,
 - traitement en fréquence, si on considère l'image comme un signal discret à deux dimensions. En effet, on peut alors représenter l'image dans le domaine des fréquences et les opérations de convolution deviennent des multiplications par des filtres.

Les *filtres de lissage* (médian, high-pass, low-pass) visent à traiter l'ensemble des détails de l'image alors que les *filtres directionnels* (gradients verticaux, horizontaux, Sobel, Prewitt...) sont conçus pour mettre en évidence des lignes, des surfaces, des limites, ou des contours constitués par des groupes de pixels organisés. L'utilisation de ces filtres peut être complétée par quelques calculs algébriques simples effectués entre deux images ou entre deux bandes spectrales d'une même image. Ces opérations correspondent à des additions, soustractions,

divisions, à des calculs d'indices et sont réalisées en combinant plusieurs canaux d'une image multibande (indice de végétation par exemple)..

3. **analyse statistique et probabiliste** si on considère l'image comme une population d'éléments (pixels) répartis sur une surface (ou un volume donné dans le cas d'images multibandes). Le calcul des paramètres statistiques qui la représentent (moyenne, écart-type, variance...), ou l'analyse des corrélations entre plusieurs canaux d'une même image, ou entre plusieurs images (calcul des covariances, des coefficients de corrélations...) sont alors envisagés. Enfin, des méthodes d'analyses statistiques de répartition de données peuvent être mises en œuvre telle l'*analyse en composantes principales* (ACP). Le principe de cette méthode est de rechercher les axes principaux d'allongement du nuage de points que représente l'image. Par projection sur ces axes, de nouvelles valeurs de radiométrie sont alors calculées. Elles fournissent ainsi de nouveaux canaux porteurs d'informations décorréliées.

Une autre façon d'analyser finement les caractères spectraux des pixels est de réaliser des *classifications*, en fonction des radiométries des pixels et de leur répartition sur l'image. Ces classifications peuvent se faire *de façon supervisée*, en tenant compte des informations apportées par l'opérateur (mesures de radiométries au sol, échantillons pris dans certains secteurs de l'image...) ou *de façon automatique*. Dans les deux cas, on se fixe des lois de probabilités pour qu'un pixel appartienne ou non à une classe donnée. Ces opérations entraînent le découpage de l'image en secteurs de mêmes caractéristiques spectrales.

4. **analyse de l'image par morphologie mathématique**. Cette analyse est basée sur la théorie des ensembles. Elle vise à mettre en évidence les caractéristiques spatiales contenues dans l'image satellitaire en délimitant des ensembles par leurs contours. Elle s'effectue au moyen d'outils, appelés *éléments structurants* associés à des *opérateurs mathématiques* tels que l'intersection, la réunion, la complémentarité... Ces éléments structurants sont en général des segments de droites qui par assemblages entre-eux permettent d'obtenir des éléments plus complexes (rectangles, cercles...). A partir des opérateurs et de ces éléments structurants, on définit un ensemble d'opérations, comme par exemple, la recherche de l'ensemble des intersections du centre de l'élément structurant avec les contours des ensembles de pixels de l'image. L'image qui comporte les contours ainsi mis en évidence, est alors produite, soit en les dilatant (dilatation), soit en les réduisant (érosion). Par itérations successives appliquant ces opérations élémentaires, on peut ainsi réaliser des filtres spécifiques des images satellitaires. Ce type d'analyse n'a pas été utilisé au cours de ce travail, car cette méthode est délicate à mettre en œuvre avec des images satellitaires. La définition précise d'ensembles fermés, à contenu radiométrique homogène, est rendue difficile par la grande disparité des valeurs radiométriques des pixels de ces images.

Exemples de traitements utilisés

Les traitements réalisés au cours de ce travail répondent à deux objectifs précis :

1. extraire les informations concernant les structures fragiles présentes dans les secteurs étudiés (répartition, directions, estimations des rejets, chronologie relative entre diverses familles de failles, définition des zones de blocs basculés ...)
2. identifier sur les images, par leurs propriétés spectrales, des marqueurs géologiques (surfaces-repère) bien individualisés sur l'ensemble des secteurs étudiés, et reconnus sur le terrain.

Quelques uns des traitements utilisés sont illustrés par les figures suivantes (II.7, II.8), ainsi que les compositions colorées établies permettant d'obtenir des résultats intéressants notamment pour l'identification de marqueurs géologiques.

La figure II.7 montre la différence entre une image brute, une image égalisée et une image étalée pour laquelle les bornes d'étalement sont précisées. Pour chaque traitement, l'histogramme de répartition des pixels est présenté. Les traitements présentés sont réalisés ici sur le canal 4 d'un extrait de la scène Landsat TM 166-51.

La figure II.8 illustre les effets de quelques-uns des filtres présentés et utilisés au cours de la phase de traitement des images. L'image traitée est un extrait de la scène SPOT 149-323 panchromatique. L'interprétation structurale du secteur est élaborée à partir des images traitées. Il faut noter l'efficacité du filtre "contour" pour faire ressortir les chevrons (indicateurs de pendage) au dos de la surface structurale visible sur l'image.

1.2.3 Restitution et interprétation des images à différentes échelles

Après ces divers traitements, les images sont soit visualisées directement sur les écrans couleur des stations de travail soit imprimées en couleur ou en niveaux de gris, afin de réaliser des cartes morphologiques, structurales, lithologiques. Selon l'échelle à laquelle sont restituées ces images et compte-tenu de leur résolution au sol, des études peuvent être réalisées sur de grands secteurs (détection des structures majeures et des grands ensembles lithologiques) mais également sur des zones plus réduites afin de réaliser des études de détails.

Au cours de ce travail, des mosaïques Landsat 1, 2 et Landsat TM au 1/500 000 et au 1/1 000 000 ont été utilisées pour l'analyse à petite échelle, des structures du rift Est-africain au Kenya, et du sud de la péninsule arabique (Yémen). Des scènes des satellites Landsat TM et SPOT au 1/100 000 voire même au 1/50 000, ont été utilisées pour l'analyse détaillée de secteurs plus précis, au Kenya et au Yémen.

Figure II.7 Exemples d'amélioration du contraste d'une image. L'extrait présenté correspond au canal 4 de la scène Landsat TM 166-51 (échelle = 1/500 000). a- Image brute; b- Image égalisée; c- Image étalée. Pour chaque image, l'histogramme de répartition des pixels est présenté.

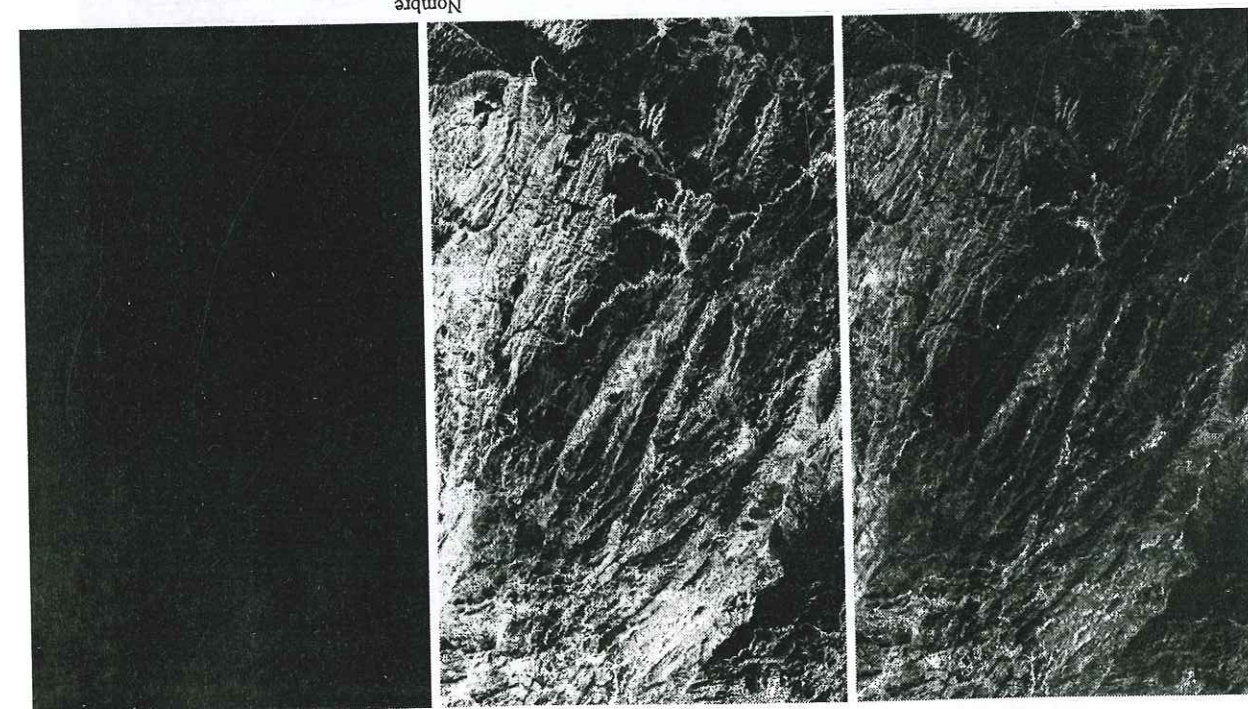
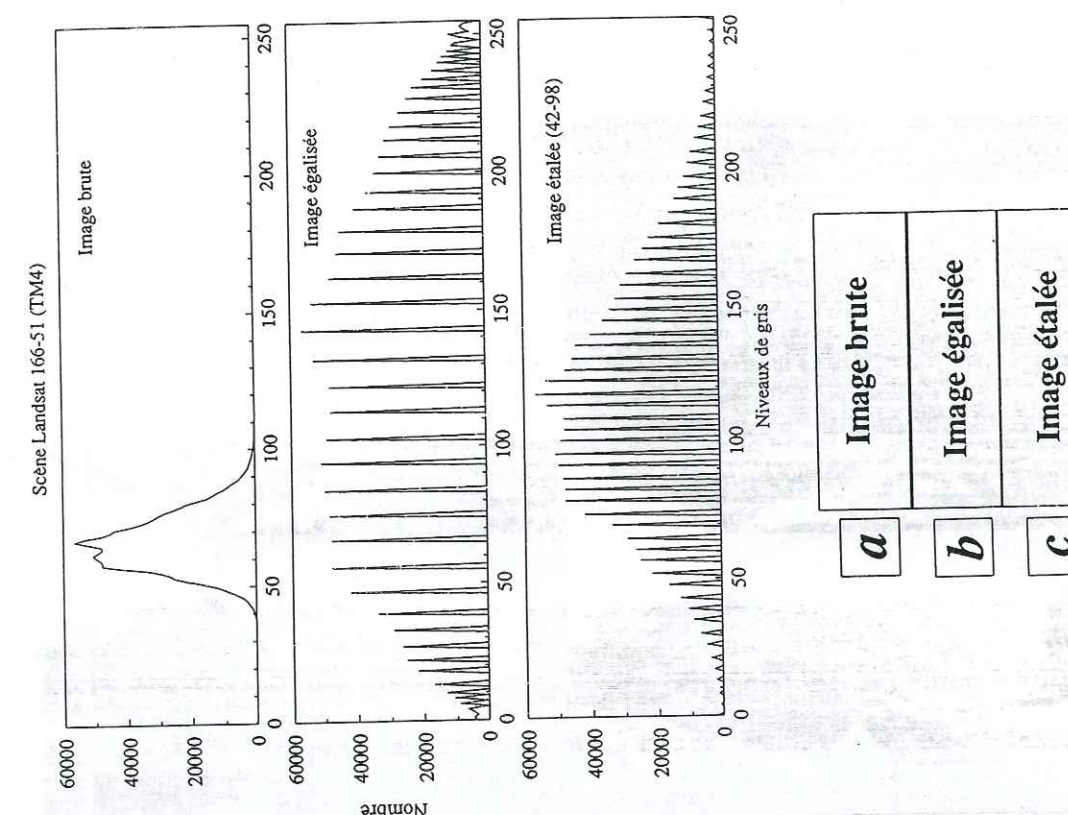
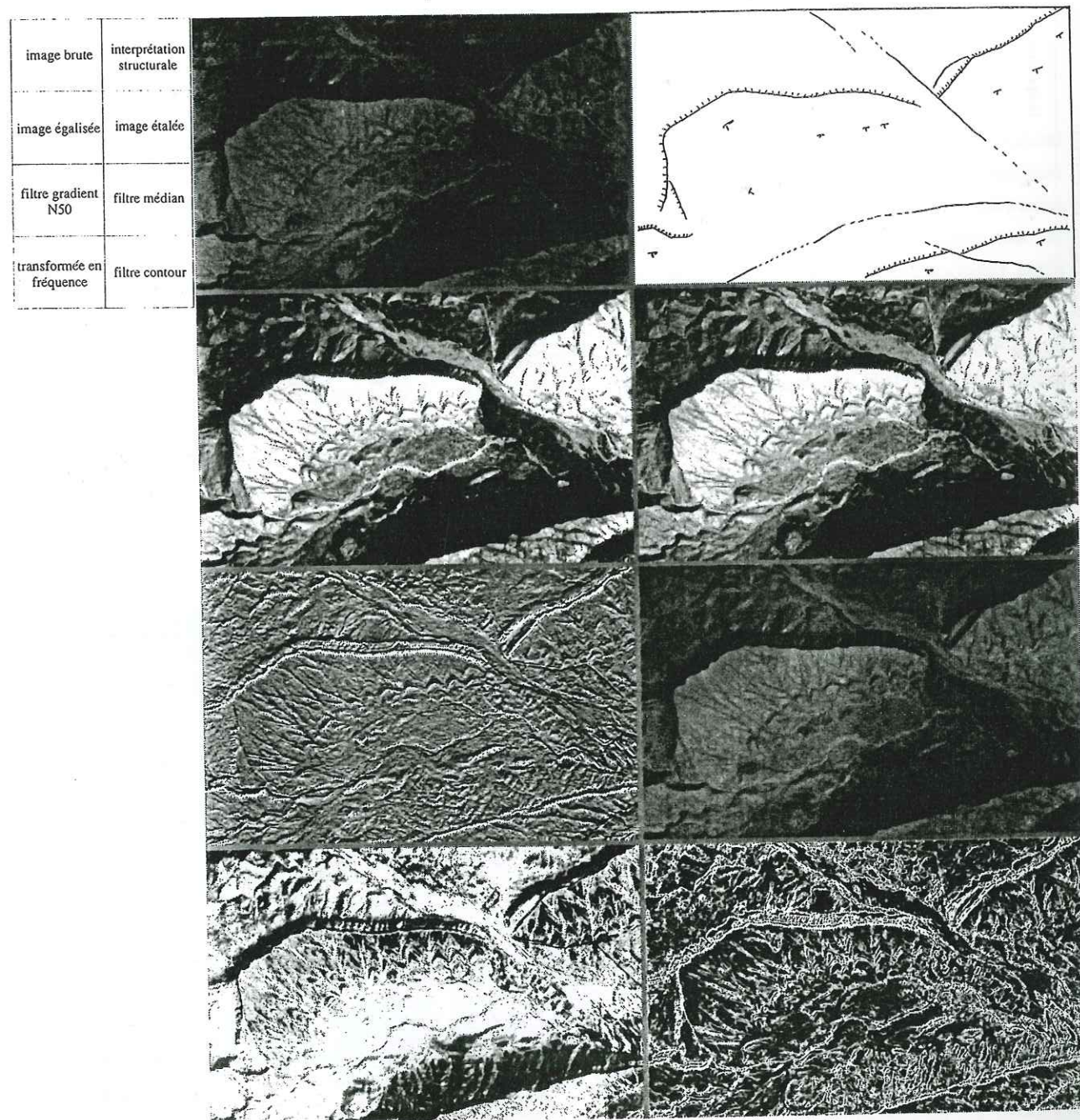


Figure II.8 Exemples de filtrages d'un extrait de la scène panchromatique SPOT 149-323 (échelle = 1/100 000). Chaque filtrage est référencé dans le cadre situé en haut à gauche.



II.2 Modèles numériques de terrain (MNT)

II.2.1 Définitions

Un modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation du relief terrestre sous la forme d'un fichier de points (X, Y, Z) disposés aux nœuds d'une maille régulière au pas fixé.

Il existe deux méthodes pour obtenir de tels fichiers [Muller et al, 1988], soit analogiquement, soit numériquement :

- digitalisation de courbes de niveaux d'après des cartes topographiques puis interpolation pour obtenir une surface à maille régulière. Sur le même principe, on peut réaliser des mesures photogrammétriques (à partir de photographies aériennes par exemple) à l'aide d'un photo-restituteur. Cette dernière méthode fait appel au *principe de stéréoscopie* qui permet la visualisation en relief d'un secteur à l'aide de deux photographies caractérisées par des angles de prise de vue différents. Dans les deux cas, ces méthodes font appel à des opérateurs qui réalisent la saisie des points de façon manuelle, ce qui limite leur utilisation à des zones relativement réduites (réalisation assez longue).
- corrélation automatique de données stéréo-photogrammétriques (images satellitaires par exemple). Sur le principe de la stéréoscopie rendue possible par les caractéristiques de certains satellites, notamment le satellite SPOT (figure II.2), cette méthode consiste à repérer numériquement des *zones homologues* sur deux images différentes d'un même secteur à l'aide de filtres de corrélation. Elle permet ensuite de restituer les altitudes, à l'aide d'un modèle mathématique reliant les coordonnées "image" de chaque pixel à ses coordonnées au sol.

Les MNT utilisés au cours de ce travail sont produits à partir d'un semis de points calculés par Michel Mémier [Sintegra – Laboratoire TIM3-équipe RFMQ] à l'aide d'une méthode de corrélation automatique de couples stéréoscopiques du satellite SPOT [Mémier, 1991].

II.2.2 Principe de calcul d'un MNT

Les différents algorithmes qui existent pour calculer des MNT à partir d'images satellitaires (principalement SPOT et Landsat) sont basés sur deux points fondamentaux [Ruesch et Laurore, 1990; Mémier, 1991]:

1. mise en correspondance de points des deux images par corrélation numérique,
2. restitutions des altitudes à partir d'un modèle géométrique.

Les principes illustrés dans les parties suivantes concernent les MNT calculés à partir d'images SPOT mais restent valables pour tout autre couple d'images issu d'une source différente.

2.2.1 Appariements de points

Cette étape de calcul correspond à la recherche de points homologues sur chacune des deux images, c'est-à-dire à l'analyse de la disparité entre les deux images [Ruesch et Laurore, 1990; Mémier, 1991].

Elle peut se réaliser par comparaison des voisins d'un point homologue donné (corrélation de voisinage). Dans ce cas, l'entité de base ou *primitive* servant à la corrélation est un pixel associé aux 8 pixels qui l'entourent [Mémier, 1991]. Ce type d'analyse correspond plutôt à une *analyse texturale* (étude d'une surface).

On peut également rechercher des primitives de l'image par l'analyse, non plus d'une surface, mais d'un ensemble de pixels définissant après filtrage, un contour entre des régions à caractères

radiométriques différents. La corrélation s'effectue alors par comparaison des caractéristiques de ces "contours" (longueur, orientation ...) [Mémier, 1991], voire même par "corrélation hiérarchique des contours" c'est-à-dire par corrélation sur différents niveaux de résolution d'une image [Ruesch et Laureore, 1990].

Le principe de calcul des MNT utilisés au cours de ce travail s'appuie sur une corrélation "hybride" à partir d'une analyse texturale. Un des points importants de la méthode de calcul mise au point par Mémier [1991] correspond au fait que cette corrélation n'est pas réalisée directement sur les images brutes mais sur des images rééchantillonnées et replacées dans une géométrie épipolaire. Dans cette géométrie, la direction selon laquelle s'effectue la corrélation (lignes épipolaires) est parallèle aux lignes de l'image. Ceci entraîne une modification de la géométrie initiale de l'image qu'il est possible de retrouver par la transformation inverse. [Mémier, 1991].

2.2.2 Restitution des altitudes

Pour réaliser cette partie du calcul, il faut trouver les transformations géométriques permettant de passer du système de repérage des images (propre aux capteurs du satellite) à un système de repérage cartographique (représentation plane de la surface terrestre). Ceci implique de reconstituer la zone source virtuelle de tous les rayons issus des deux images par l'établissement d'un modèle mathématique intégrant l'ensemble des paramètres de prise de vue des images, les variations d'attitude du satellite SPOT sur son orbite ainsi que le mouvement terrestre.

Le calcul du MNT revient alors à établir la fonction mathématique qui relie les coordonnées X, Y, Z d'un point au sol (dans un repère cartographique donné) à ses coordonnées P, Q sur chacune des deux images (après corrélation des points homologues).

2.2.3 Limites au calcul des MNT

L'objet de ce paragraphe n'est pas de commenter les simplifications établies lors de la résolution des équations mathématiques concernant le calcul numérique des MNT, mais de préciser la validité des données topographiques calculées, par rapport à l'utilisation qui en sera faite au cours de ce travail.

Un critère de qualité imposé par le calcul correspond à la possibilité d'existence de la géométrie épipolaire dans laquelle sont projetées les images. Mémier [1991] a démontré que cette condition d'existence était fonction de la latitude de prise de vue des images. Pour les images SPOT concernant le Yémen, cette condition est respectée.

La qualité du MNT va dépendre de la qualité radiométrique des deux images SPOT utilisées pour le calcul, principalement à cause du maximum de ressemblance souhaité entre les deux scènes (facilité d'appariement des primitives). Ceci impose des contraintes sur les scènes utilisées. L'acquisition de deux images SPOT d'un même secteur doit se faire avec un écart en date relativement faible, en tenant compte des conditions atmosphériques (couverture nuageuse nulle notamment). L'écart en date peut éventuellement être plus important, dans des zones dont les caractéristiques de surface changent peu, tout en respectant les différences de végétation entre les saisons. Il est également nécessaire de traiter au préalable les images, avant de procéder au calcul numérique. De plus, les images SPOT utilisées ne doivent pas avoir subi de corrections géométriques ce qui entraînerait des transformations mathématiques supplémentaires lors du calcul des MNT. Ceci implique l'utilisation d'images SPOT de niveau 1A [Spot Diffusion, 1989].

La précision en altitude du MNT varie en fonction du rapport "B/H" qui correspond à la distance au sol entre les deux points de vue (b) et de l'altitude du satellite (h) (figure II.2). Ce rapport peut donc varier en fonction des zones étudiées. Ainsi, pour des zones montagneuses, il faut un angle de prise de vue plus important entre les deux images pour obtenir une grande

précision [Ruesch et Laureore, 1990]. Ce rapport conditionne en fait la précision relative en altitude, entre deux points du MNT.

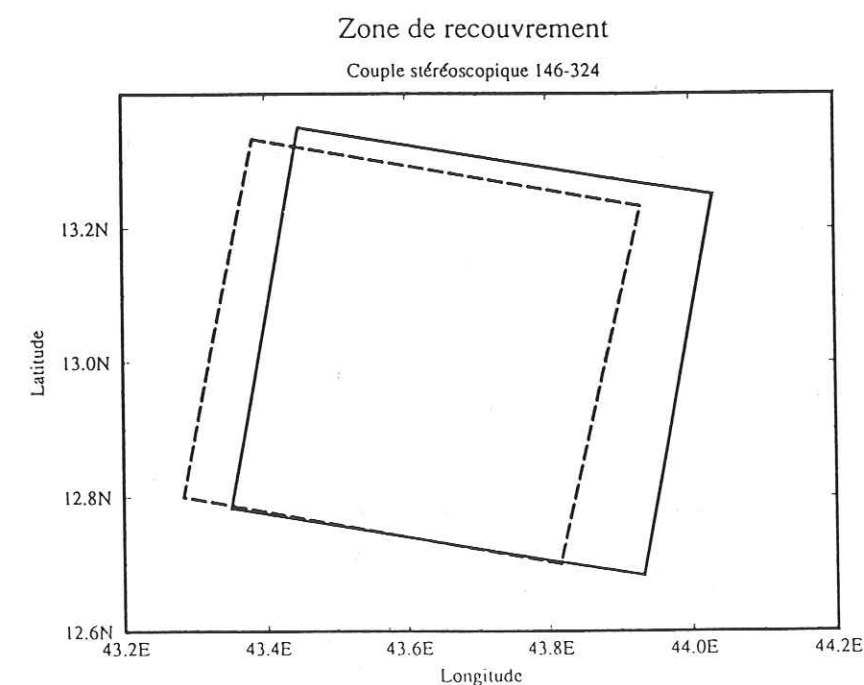
Afin de caler le MNT dans une géométrie cartographique connue, il est nécessaire de disposer de points d'appui précis. Compte-tenu des cartes du Yémen dont nous disposons lors du calcul [carte de navigation aérienne TCP-K6A au 1/500 000, fonds topographiques au 1/100 000 du Geological Survey of Yemen], la précision absolue des MNT en altitude est relativement moyenne, mais ne pose pas de problèmes particuliers pour l'utilisation faite de ces données. La définition de ces points d'appui sur les deux images s'est faite manuellement mais la validité de chaque point a été analysée au cours du calcul du MNT, pour limiter les erreurs d'estimations toujours possibles.

Enfin, ces calculs numériques demandent des temps de C.P.U. assez conséquents et nécessitent donc l'utilisation de matériels de calcul performants.

II.2.3 Extraction des coordonnées de points homologues sur les images SPOT

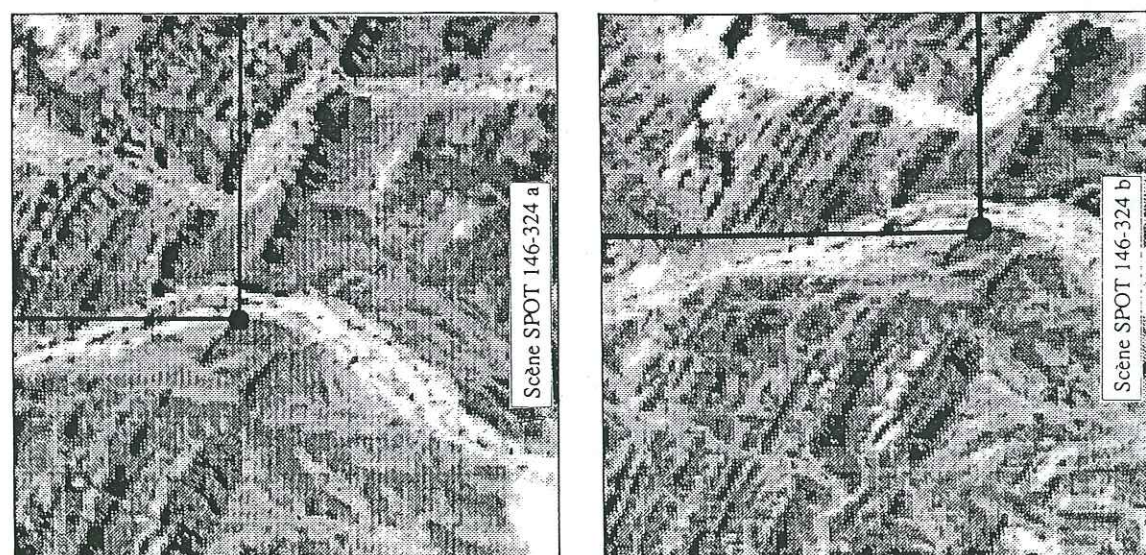
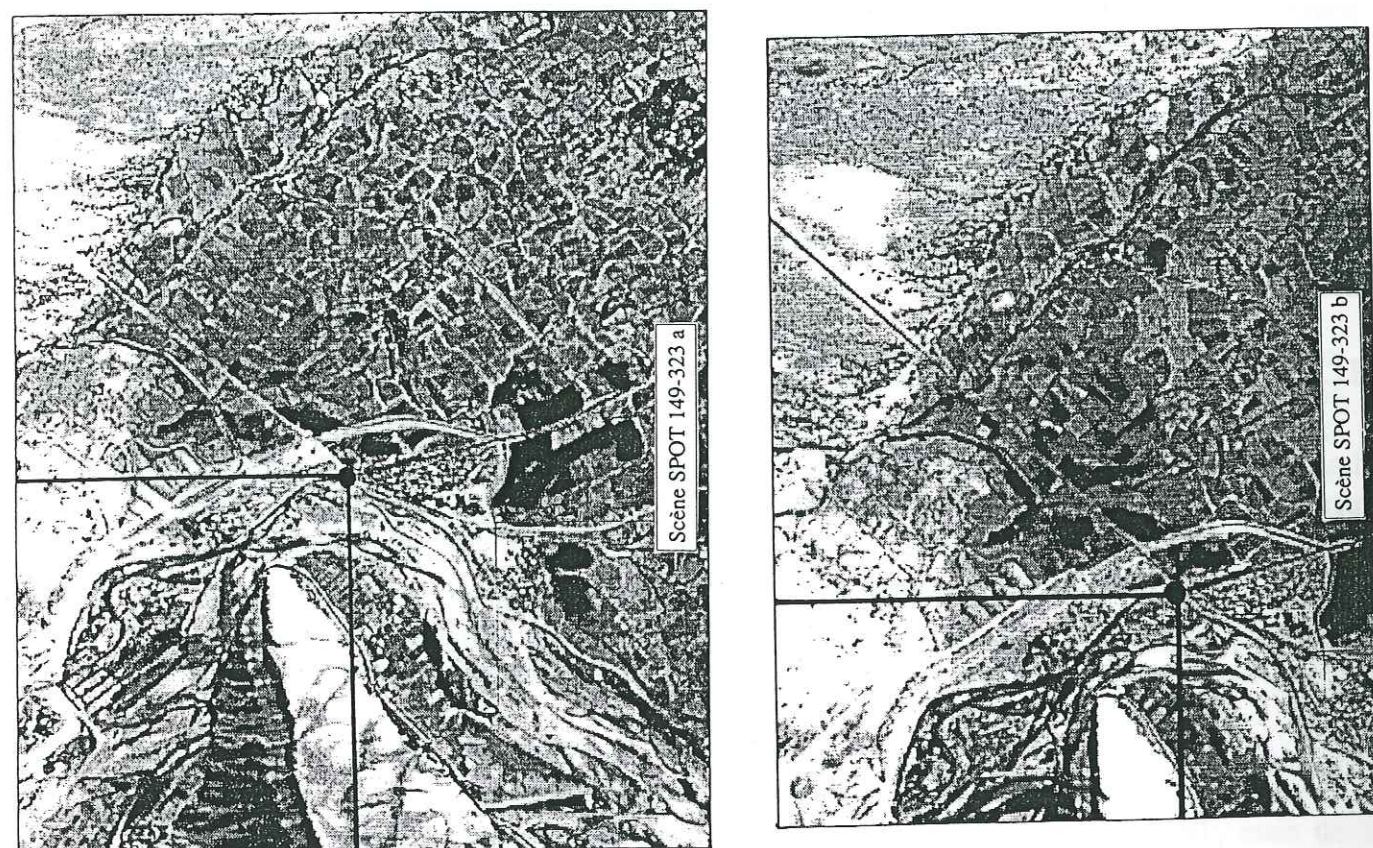
Cette phase préliminaire au calcul numérique consiste à rechercher sur chacune des deux images SPOT des zones caractéristiques qui serviront à contraindre le modèle géométrique permettant de restituer les altitudes. Pour extraire ces primitives, il faut dans un premier temps repérer la zone de recouvrement sur chacune des deux images permettant une vision stéréoscopique (figure II.9).

Figure II.9 Identification de la zone de recouvrement sur les scènes SPOT 146-324, avant l'extraction de points homologues. Le cadre en trait continu représente la scène du 19-05-1988, et le cadre en traits pointillés, la scène du 02-12-1988.



Sur cette zone, les primitives composées de points caractéristiques (croisements de rivières, de routes, limites de végétation, points culminants, limites de formations géologiques...) sont repérées sur les deux images. A l'aide du logiciel XV de visualisation et manipulation d'images, les coordonnées P et Q des points homologues sont alors déterminées de la façon la plus précise possible (c'est-à-dire au pixel près) par leur position en ligne et en colonne sur les deux images.

Figure II.10 Repérage de points homologues sur deux images panchromatiques du satellite SPOT avant le calcul du MNT. Chaque point (cercle noir) correspond à un point caractéristique, facilement identifiable sur les deux images du couple. Il est repéré au pixel près, sur les deux images, par sa position en ligne et en colonne.



La figure II.10 présente un exemple de ce travail réalisé sur le couple stéréoscopique SPOT 146-324, focalisé sur le sud-ouest du Yémen. Le calcul d'un MNT nécessite l'identification d'une cinquantaine de points homologues par couple stéréoscopique d'images SPOT. Ceci implique donc la réalisation d'autant d'extraits sur chacune des images du couple, l'identification des points homologues sur les deux images et la mesure de leurs coordonnées. Pour chaque MNT calculé, les coordonnées des points homologues identifiés sont référencées en annexe (Annexe 2).

Ensuite, chaque point ainsi identifié est positionné sur un repère géographique qui va conditionner les coordonnées en X et Y du MNT. Les points précédemment définis sont placés, pour chaque MNT calculé, par rapport à un repère défini sur la carte de navigation aérienne [TPC K-6A] au 1/500 000, ou sur des fonds topographiques au 1/100 000, seules cartes disponibles au moment du calcul des MNT. Pour certains points particulièrement bien identifiés, une valeur d'altitude (en mètres) est déterminée. L'obtention ultérieure de cartes topographiques au 1/50 000 du Geological Survey of Yemen (construite à l'aide de l'IGN) a permis un calage en altitude un peu plus précis. Les points pour lesquels les coordonnées en XYZ sont définies, serviront de points d'appui (amers) permettant de replacer le MNT calculé dans une géométrie connue (position XY), et de recalibrer les points de ce MNT en altitude.

II.2.4 Corrections et traitements des MNT

Les calculs numériques réalisés par Mémier [Sintegra - TIM3] pour obtenir un MNT fournissent un semis de points repérés par leurs coordonnées en X, Y et Z. L'utilisation de ces données topographiques, nécessite dans un premier temps, d'ordonner ce semis de point puis d'en corriger les éventuels défauts. Cette étape indispensable avant toute utilisation des MNT consiste en une série de filtrages qui ont été réalisés à partir de la version 2.1 du logiciel GMT développé par Wessel et Smith [1991]. Ce logiciel permet notamment de manipuler des données au format XYZ. De plus, divers programmes en C ont été conçus parallèlement pour permettre :

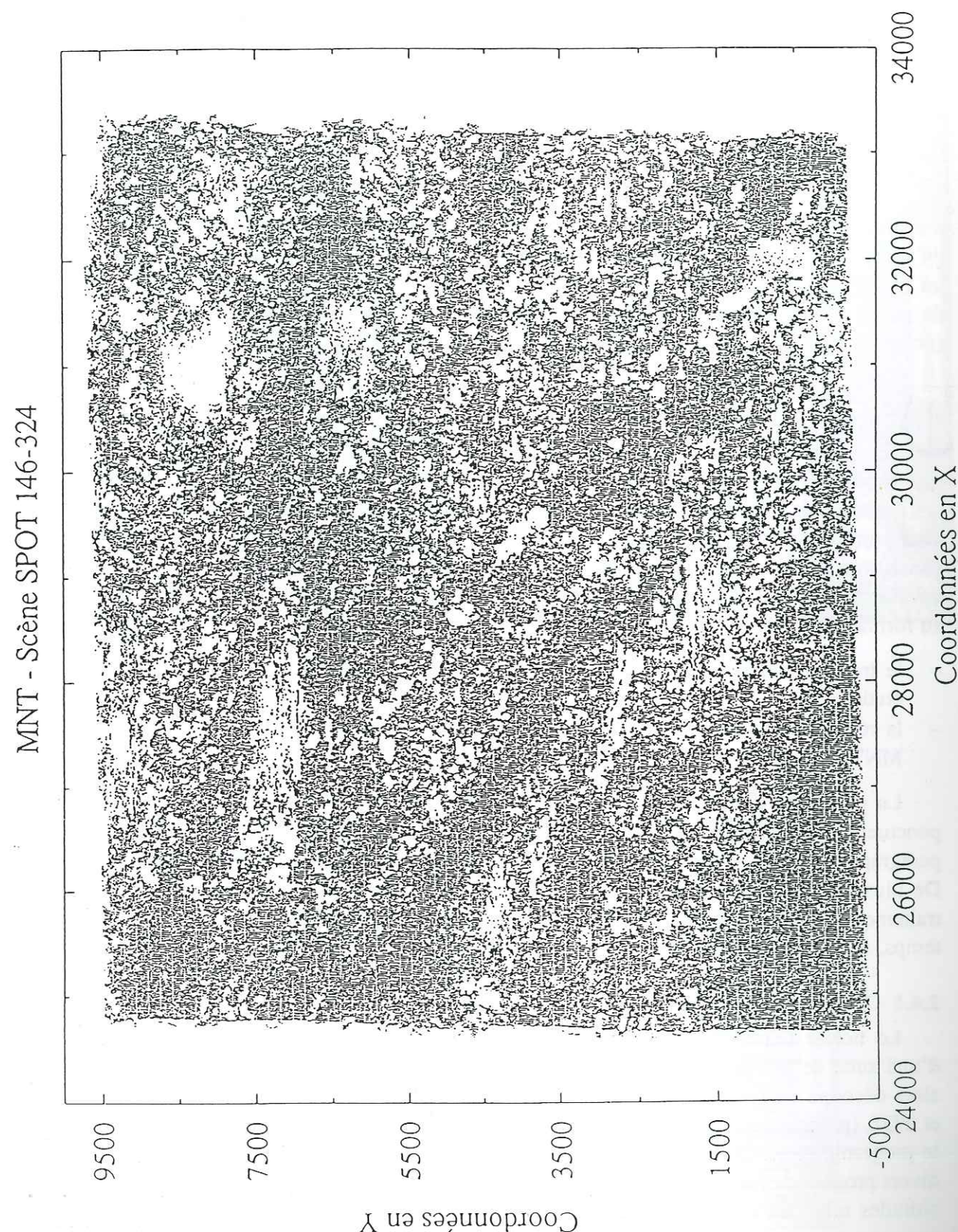
- le transfert des données aux différents formats des programmes utilisés au cours de cette étude,
- la réalisation de calculs numériques (ortho-image, correction des erreurs d'altitude sur les MNT ...).

La procédure d'amélioration des MNT ne peut pas être automatique et doit être adaptée ponctuellement aux spécificités des différents MNT. Ainsi, les explications fournies dans les paragraphes suivants ont pour but d'illustrer la démarche suivie à partir de quelques exemples. De plus, de nombreux tests ont été réalisés sur plusieurs MNT afin de choisir au mieux les traitements appropriés à ces données topographiques. Cette partie du travail, très coûteuse en temps, n'apporte que des résultats techniques qui ne sont pas présentés ici.

2.4.1 Corrections altimétriques et interpolation des altitudes sur une grille régulière

Le fichier fourni par le calcul de Mémier [Sintegra - TIM3] se présente sous la forme d'une suite de nombres codés en ascii ou en binaire et rangés de façon non-ordonnée. Il est alors découpé en deux fichiers au format ascii contenant respectivement les coordonnées XYZ et PQZ (programmes *mntm2f.c* et *mntm2i.c*). Dans le cas de fichiers bruts codés en binaire, le programme *mntmform.c* permet de transformer les données au format ascii utilisable par les divers programmes spécifiques développés en C et par le logiciel GMT. De plus, connaissant les altitudes minimales et maximales du lieu où sont calculés les MNT, les points-faux (altitudes aberrantes) sont systématiquement éliminés. La représentation graphique du semis de points dans un repère XY est illustrée par la figure II.11.

Figure II.11 Localisation des points issus du calcul du MNT dans le repère géographique utilisé pour ce calcul. La figure présentée comporte 1 236 910 points. Les zones en blancs (pas de points calculés) correspondent à des zones où l'auto-corrélation numérique n'a pu être réalisée (nuages, variations importantes de radiométrie entre les deux images ...).



Les zones sans valeurs correspondent à des zones où l'auto-corrélation n'a pu être réalisée entre les deux images. Ces erreurs de corrélation sont essentiellement dues à la présence de nuages sur une des images ou à des changements radiométriques liés par exemple à des changements de végétation (écart en temps important entre les deux images) [Ruesch et Laurore, 1990; Mémier, 1991, 1992]. De plus, la répartition des points en XY n'est pas régulière ce qui pose des problèmes pour une manipulation simple et rapide de ces données.

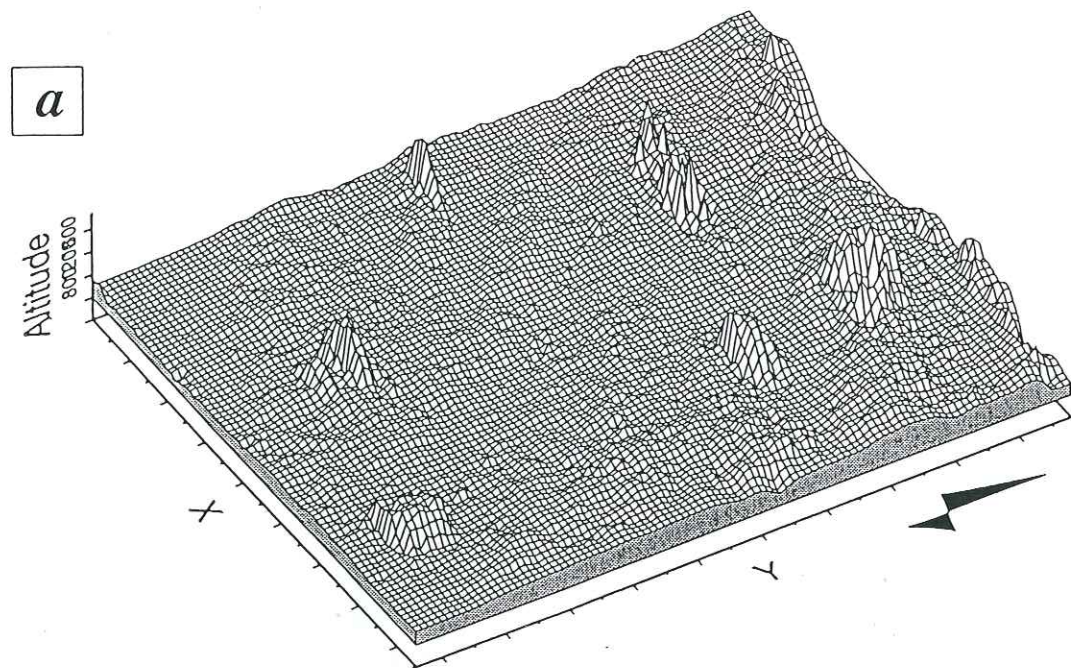
Le premier travail consiste donc à rendre régulier ce semis de points en le plaçant sur une grille à maille régulière choisie en fonction de la résolution du MNT. Les MNT sont calculés à partir d'images panchromatiques SPOT avec une résolution au sol de 10 mètres. Cependant, les données brutes sont interpolées pour chacun d'eux, sur une grille XY dont le pas est calculé en fonction du nombre de points disponibles et ceci, afin de limiter les valeurs interpolées au nombre de points effectivement calculés. Par exemple, un des semis de points concernant le MNT calculé à partir des scènes 146-324, comporte 1 236 910 points. La taille du secteur couvert par ce MNT est de 32,9 km par 21,1 km. L'interpolation de ces valeurs sur une grille au pas de 10 mètres donnerait 6 941 900 points (aux nœuds de la grille), soit environ 6 fois plus que le nombre de points disponibles au départ. L'utilisation d'une grille au pas de 20 mètres fournit un nombre de points de 1 735 475, beaucoup plus proche du nombre de points initial. Une grille XY avec une maille régulière de 20 m est donc superposée à ce semis de points. Ce calcul rapide de la maille adéquate pour la grille est effectué systématiquement pour tous les MNT.

Ensuite, on affecte une valeur de Z (altitude) à chaque nœud de cette grille XY, situé suffisamment proche des données initiales. Ceci est réalisé à l'aide d'un algorithme basé sur le principe du calcul de la norme L1 (programme GMT-blockmean). Ce programme ordonne également le fichier ascii XYZ par lignes et colonnes croissantes. Le fichier résultant comporte encore quelques nœuds pour lesquels aucune valeur d'altitude n'a pu être affectée. Il est alors interpolé puis formaté (GMT-surface) pour pouvoir être utilisé par le logiciel GMT. En effet, la plupart des programmes de ce logiciel ne manipulent que des fichiers au format particulier **Binary NetCDF** [Wessel et Smith, 1991], et pour lesquels, tous les points de coordonnées XY doivent être associés à une coordonnée en Z.

La deuxième étape consiste à corriger les altitudes fausses et à estimer leurs valeurs dans les zones où elles n'ont pu être calculées. Pour ceci, on visualise tout d'abord la grille précédemment obtenue soit en courbes de niveaux, soit en perspective (GMT-grdcontour et GMT-grdview), ce qui permet de repérer précisément les zones où les corrections sont nécessaires (figure II.12a,b).

Les corrections altimétriques sont effectuées par le programme *mntmcorrect.c*. Ce programme corrige les erreurs en fonction des zones voisines comme l'illustre la figure II.13. Un plan de régression moyen est calculé dans la *fenêtre comparative* à partir des données du fichier brut XYZ (semis de points). Les corrections altimétriques sont calculées pour chaque point situé dans la fenêtre corrigée. Une nouvelle valeur d'altitude est affectée en fonction des valeurs numériques du plan de régression, dans la fenêtre corrigée. Après corrections, le fichier brut XYZ est à nouveau rendu régulier et de nouvelles visualisations sont réalisées pour mettre en évidence les erreurs résiduelles. Cette méthode possède l'inconvénient de corriger les altitudes fausses en fonction d'une pente locale ce qui induit un lissage du MNT. Par contre, cette méthode permet d'affecter des valeurs d'altitude dans des zones où elles n'ont pu être calculées et ceci, en tenant compte des données environnantes, ce qui limite les risques d'erreurs (à condition bien sûr, que la superficie des zones d'erreurs ne soit pas trop importante !). Le résultat de ce premier traitement des MNT est illustré sur la figure II.14 pour le MNT calculé à partir du couple de scènes panchromatiques SPOT 146-324. La grille XY utilisée pour cette visualisation possède un pas de 100 mètres.

Figure II.12 a- Visualisation en perspective du MNT calculé à partir du couple stéréoscopique 146-324, après interpolation sur une grille au pas de 100 m; b- Localisation des fenêtres de corrections des erreurs altimétriques sur la visualisation en courbes de niveaux.



b Localisation des fenêtres de correction

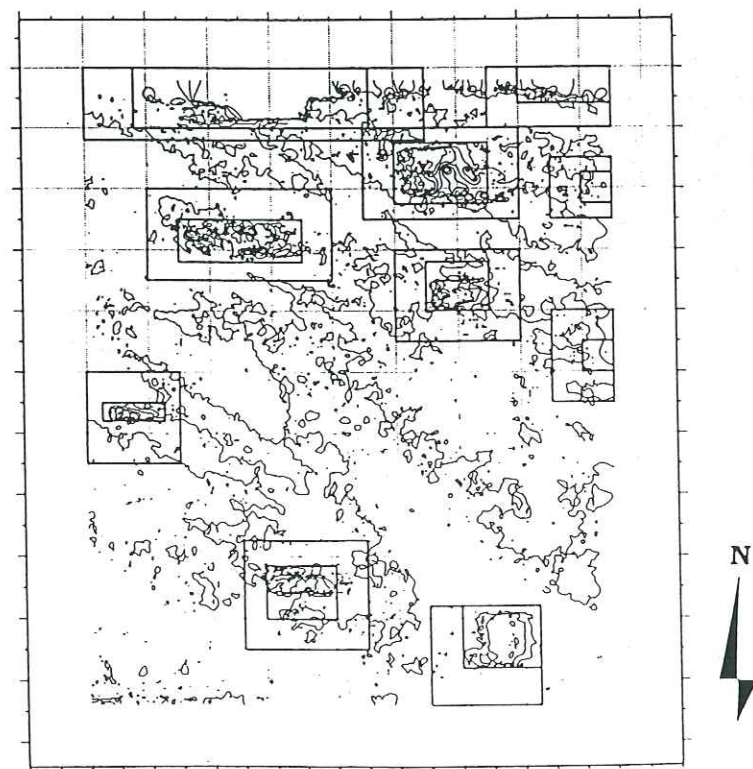


Figure II.13 Principe de corrections des erreurs altimétriques identifiées sur le MNT interpolé et appliquées sur le semis de points. La coupe A-B à travers la fenêtre comparative visualise les valeurs d'altitude utilisées pour le calcul de la régression.

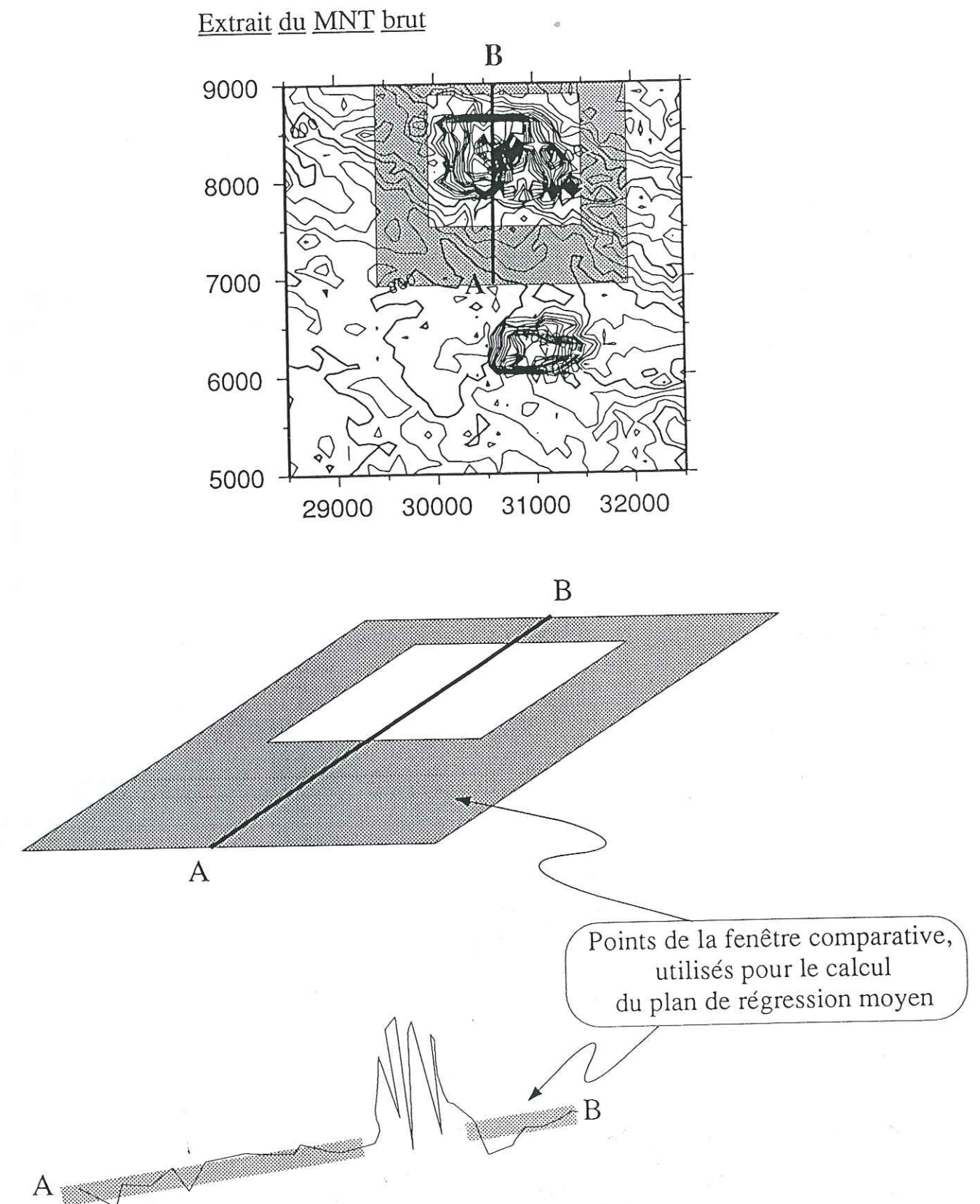
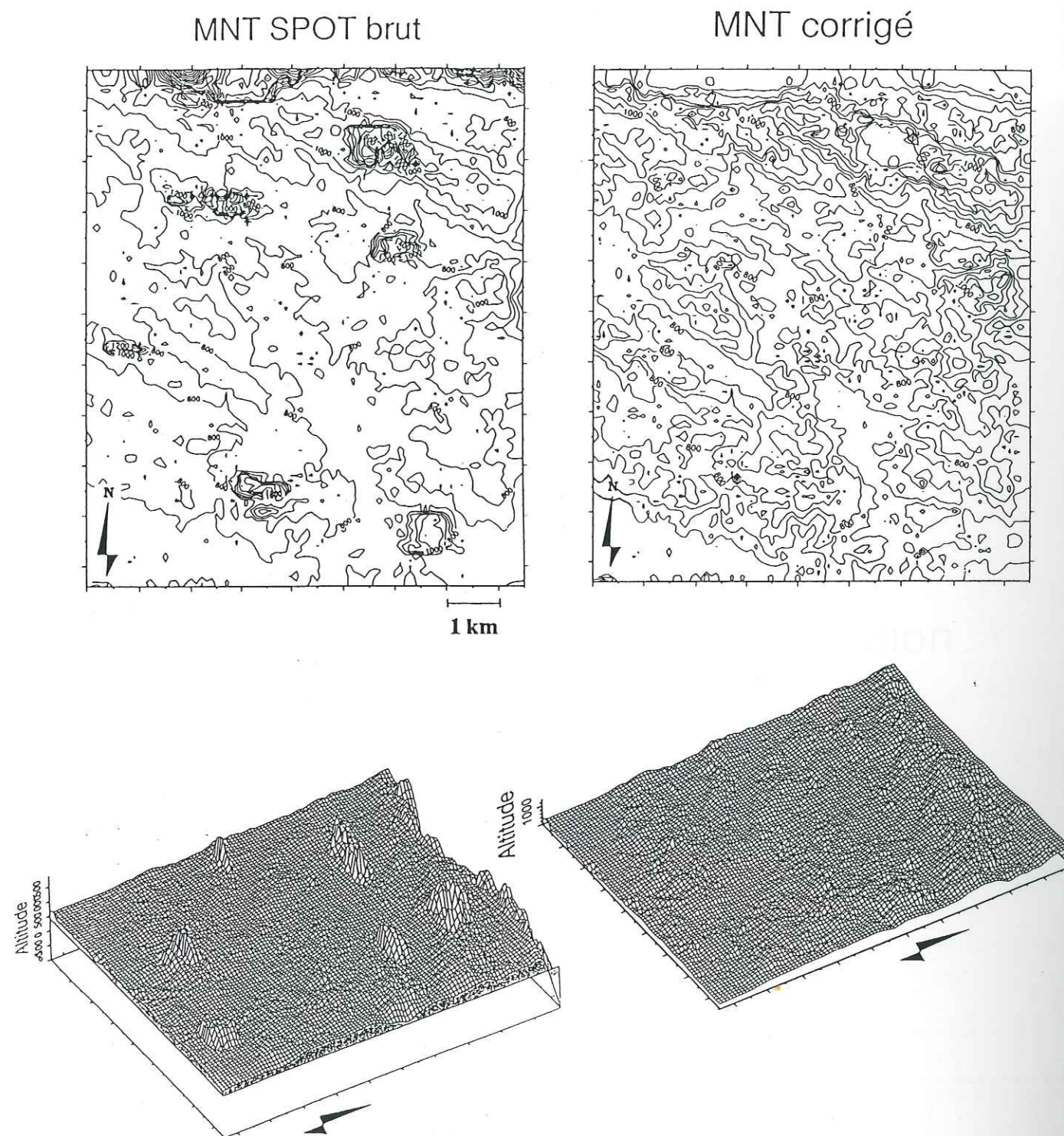


Figure II.14 Comparaison d'un MNT brut interpolé sur une grille au pas de 100 m et du MNT corrigé correspondant. (visualisation en courbes de niveaux et en perspective). L'équidistance sur les vues en courbes de niveaux est de 200 mètres. Les vues en perspective sont tracées sans exagération verticale.



2.4.2 Améliorations supplémentaires

Juxtaposition de MNT :

Les MNT sont calculés sur des parties seulement d'une image SPOT, en raison du temps de calcul et de la capacité de stockage des stations utilisées. Ainsi, une image panchromatique 6000 pixels par 6000 pixels est subdivisée en 9 sous-scènes et le calcul du MNT est effectué dans chacune des scènes avec un léger recouvrement.

Or, dans le cas où les secteurs analysés s'étendent sur plus d'une sous-scène, ce mode de calcul pose le problème de l'utilisation simultanée de plusieurs MNT calculés séparément. En fait, chaque calcul est effectué à partir des mêmes paramètres (caractéristiques du satellite, modèle géométrique ...). La réalisation d'un MNT regroupant plusieurs sous-scènes est donc envisageable.

La figure II.15 illustre la procédure utilisée pour juxtaposer 3 MNT. L'ordre des opérations est le suivant :

1. repérage des zones de recouvrement entre chacun des trois MNT,
2. interpolations des altitudes sur une grille régulière pour chacun des MNT,
3. comparaison des altitudes dans les zones de recouvrement entre le MNT central et les deux MNT situés aux extrémités du secteur analysé.

Les variations d'altitude obtenues après comparaison des MNT dans les zones de recouvrement sont faibles et comprises entre 0 et 60 m. Elles peuvent être dues à des différences de recalage ou d'appariement de primitives lors du calcul séparé de chacun des MNT. Elles peuvent également être liées à de petites variations lors de l'interpolation du semis de points sur une grille régulière. La figure II.15 présente une cartographie des variations d'altitude sur les deux zones analysées.

Compte-tenu de ces faibles variations, il est alors possible de juxtaposer les 3 MNT. Cette étape s'effectue à partir du programme *mntmcut.c* qui travaille directement sur les données brutes (semis de points corrigé) et permet d'éliminer systématiquement les points en double dans les zones de recouvrement.

Amélioration des bordures du MNT:

La manipulation de données XYZ par le logiciel GMT se fait seulement à partir d'une grille régulière, carrée ou rectangulaire. Le calcul des MNT fournit un semis de points dont le contour est rarement de forme aussi simple. La superposition d'une grille régulière plus petite que le MNT conduit à une perte d'informations qui peut être préjudiciable (élimination des zones de recouvrement entre deux MNT voisins par exemple). L'utilisation d'une grille de plus grande taille que le MNT amène à placer des valeurs nulles à tous les nœuds de la grille situés à l'extérieur du MNT. Dans la mesure où ces MNT font l'objet de corrections et d'un lissage ultérieurs, il est impératif de remplacer ces valeurs nulles par des valeurs d'altitude n'entraînant pas ou peu de modifications sur le traitement. Cette opération doit donc tenir compte des valeurs d'altitude des points situés à proximité des bordures du MNT (figure II.16).

Figure II.15 Repérage des zones de recouvrement des MNT calculés séparément et cartographie des variations d'altitude pour chaque site de comparaison.

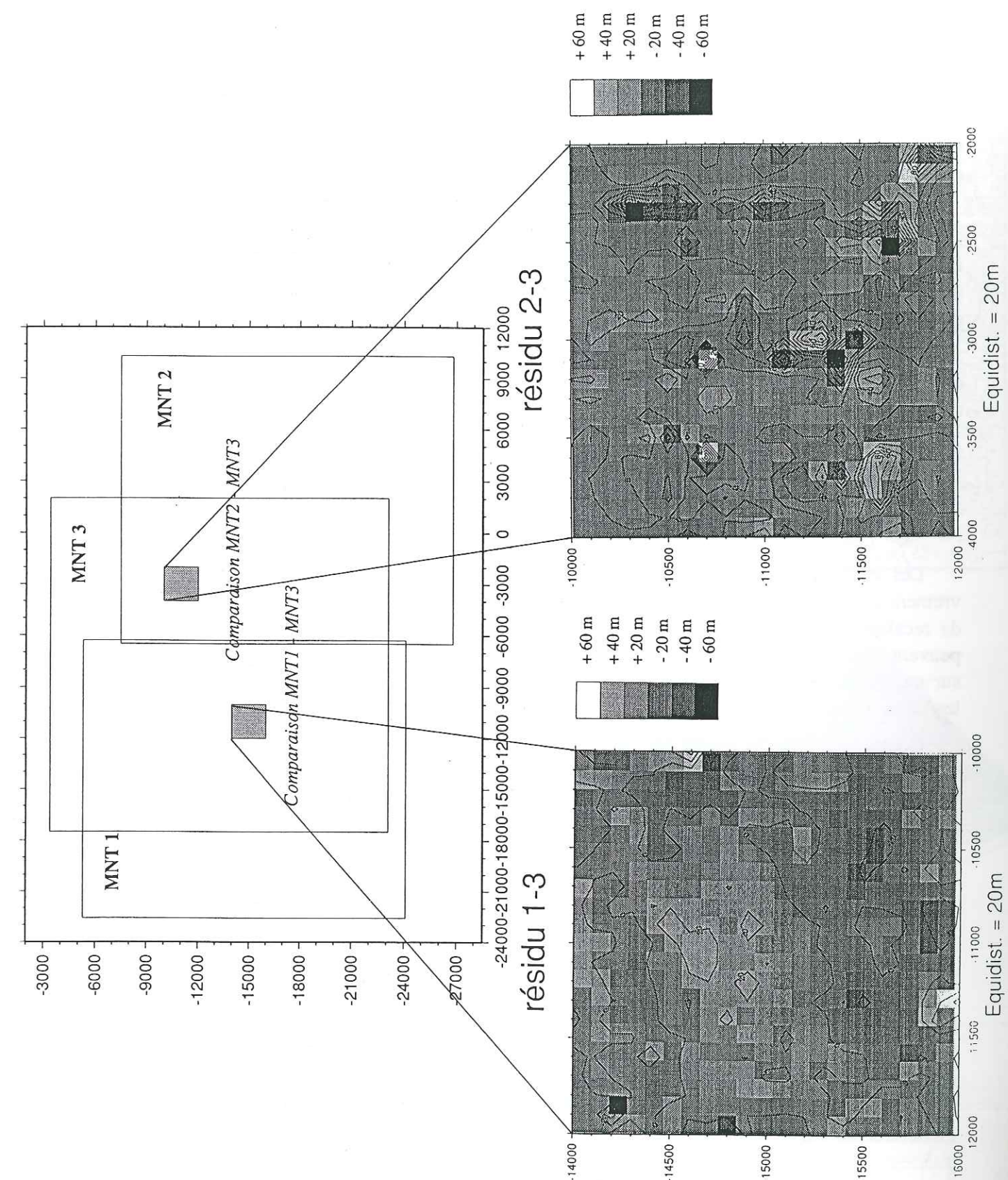
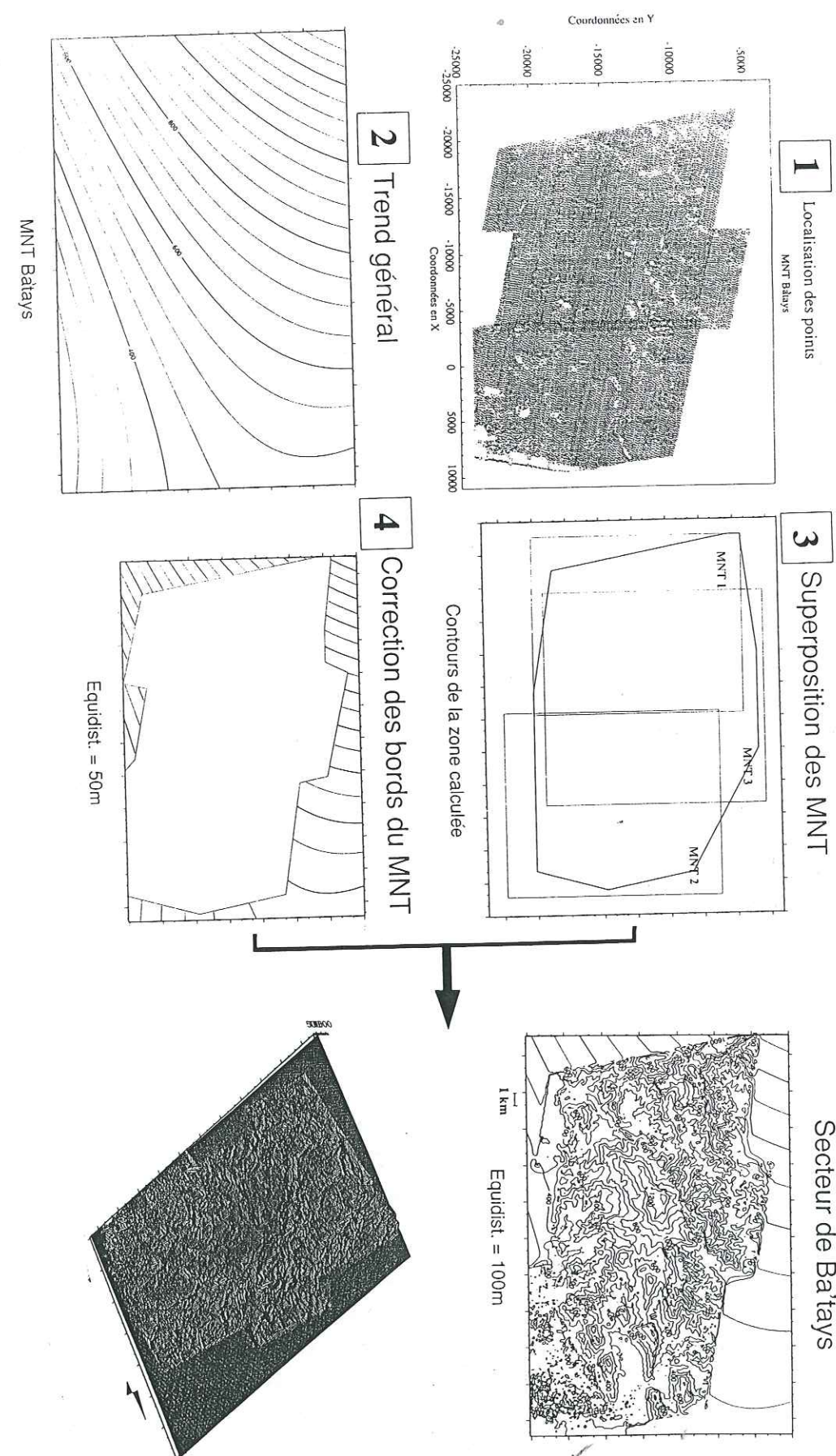


Figure II.16 Succession des étapes conduisant aux corrections des bordures non-régulières du MNT calculé sur la scène SPOT 149-323.



Dans un premier temps, on réalise une interpolation du MNT corrigé des erreurs d'altitude, sur une grille régulière au pas en XY de 100 m. Le calcul de l'enveloppe générale du MNT à l'aide d'un polynôme d'ordre N (GMT-grdtrend), ainsi que le repérage précis des contours du MNT conduisent à affecter une valeur d'altitude cohérente à chaque point situé à l'extérieur du MNT (GMT-grdmask, GMT-grdmath). Les bords du MNT ne sont pas utilisables directement, mais les conséquences de ces valeurs d'altitude sur les traitements ultérieurs du MNT sont minimales, contrairement aux valeurs nulles.

2.4.3 Lissage des MNT

Après l'interpolation sur une grille régulière, la correction des erreurs et l'amélioration des bords du MNT, intervient l'ultime étape de traitement, mais probablement la plus importante. Elle répond à deux objectifs bien précis :

- l'élimination des variations altimétriques locales de hautes fréquences,
- l'amélioration du rendu du MNT lors de la visualisation en perspective avec le logiciel XVUE3D.

L'observation du MNT en courbes de niveaux ou même en vue perspective "grillagée" montre l'existence d'un bruit de fond sur l'ensemble du MNT avec des variations locales de pente. Ces variations apparaissent préjudiciables lors de la visualisation du MNT avec le logiciel XVUE3D, notamment pour la réalisation de la triangulation, mais aussi lors de la superposition de l'image et du MNT. Le lissage des MNT consiste en une succession de traitements :

- filtre passe-bas permettant d'éliminer le bruit (GMT-grdfft). Le résultat de ce filtre est retranché au fichier initial pour réaliser les corrections.
- filtrage moyen sur l'ensemble du MNT avec un pas de l'ordre de 4 à 5 fois le pas de la grille (GMT-grdfilter). Ce filtrage produit un lissage du MNT, mais compte-tenu du pas de calcul utilisé pour le filtre, il élimine efficacement les variations locales d'altitude.

La figure II.17 rend compte des modifications apportées par ces traitements au MNT corrigé précédemment.

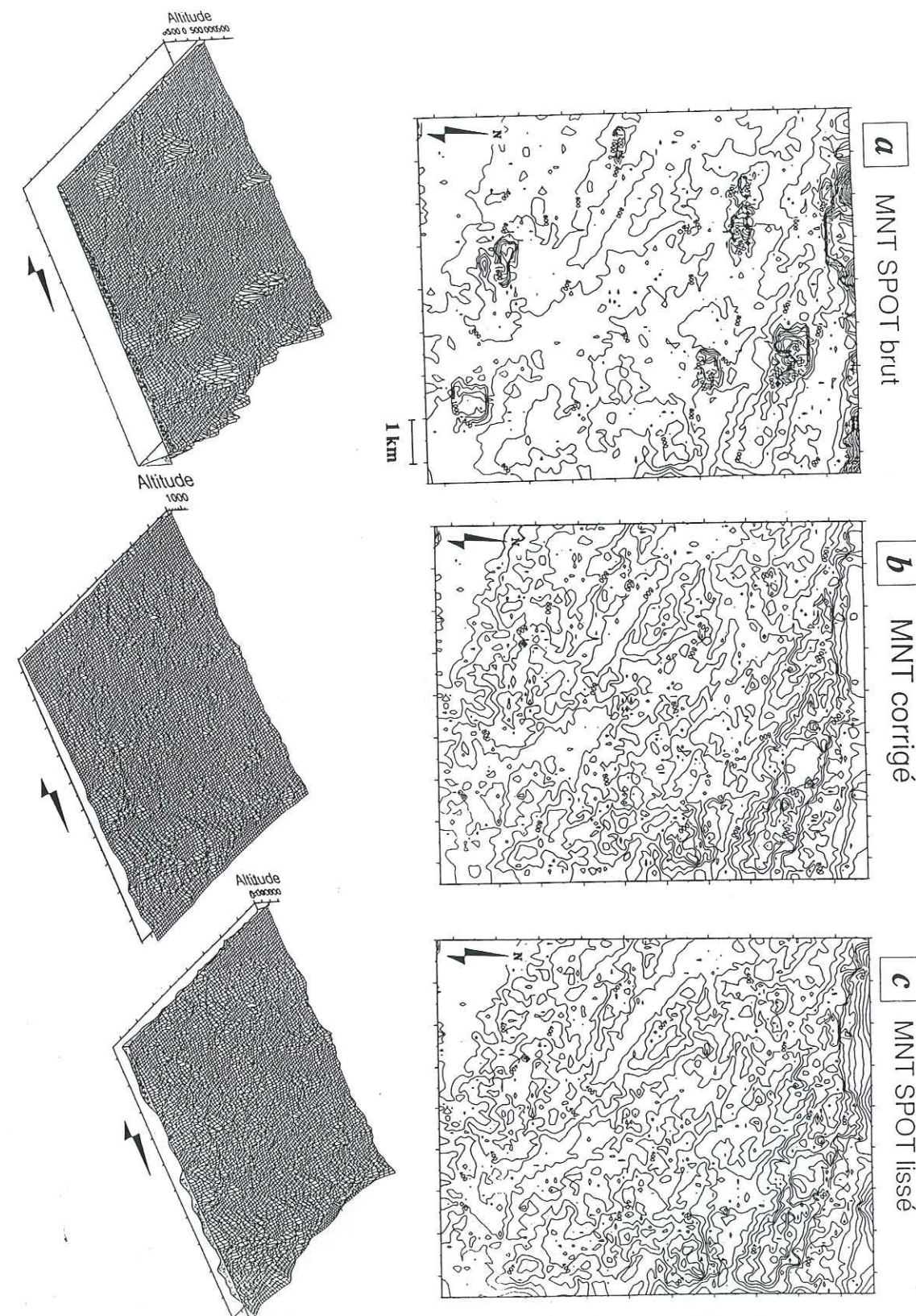
2.4.4 Réalisation de vues perspectives

Calcul des ortho-images

Le calcul du MNT s'effectue à partir d'une géométrie particulière et connue. Cette géométrie est fixée par la carte topographique utilisée pour repérer quelques points-côtés sur le MNT [carte de navigation aérienne TCP K6-A au 1/500 000 ou fonds topographiques au 1/100 000 des cartes géologiques du Sud-Yémen]. La projection utilisée pour l'élaboration de ces cartes reste cependant la même (Projection Lambert conique et conforme).

La superposition d'une image issue du satellite SPOT sur le MNT, s'effectue par projection de cette image dans la géométrie du MNT. Pour ceci, il faut connaître les différents paramètres orbitaux lors de la prise de vue effectuée par le satellite. Le calcul de la transformation géométrique est réalisé pour chaque secteur à l'aide du programme *orthogrid.c*. Il utilise les différents paramètres orbitaux du satellite SPOT au moment de la prise de vue de l'image-référence du couple stéréoscopique. Il calcule les coordonnées PQ de chaque point de l'ortho-image à partir des coordonnées X, Y et Z du MNT. De plus, certains paramètres liés au calcul du MNT sont nécessaires pour réaliser la transformation. Ceux-ci sont fournis avec le fichier de données brutes.

Figure II.17 Visualisation en courbes de niveaux et en perspective des résultats du lissage du MNT calculé à partir du couple d'images SPOT 146-324. a- MNT brut; b- MNT corrigé; c- MNT lissé.



Ensuite, à partir du fichier XYPQ ainsi créé, le programme *creatorthoi.c* permet de reconstruire l'ortho-image en affectant à chaque point une valeur de radiométrie. Chaque valeur de radiométrie est recalculée par un algorithme de plus proche voisin en fonction des valeurs de l'image de départ. On obtient alors un fichier codé en ascii avec P, Q (position du pixel dans l'ortho-image) et R (valeur de radiométrie de chaque pixel) qui est ensuite transformé au format *raw* (programme *xyz2v3d.c*).

Le résultat obtenu est directement superposable au MNT afin de réaliser une visualisation 3D. Chaque point de l'image est vu selon une ligne verticale c'est-à-dire que tous les rayons issus de l'image et partant de chacun des pixels sont parallèles entre eux [Muller, 1988; Mémier, 1991]

Visualisations 3D

Les vues perspectives utilisées au cours de ce travail ont été réalisées à partir du logiciel XVUE3D développé par la société ISTAR (Nice). Ce logiciel utilise les données dans un format bien précis. Les valeurs de radiométrie des images doivent être codées sur 1 octet comme la plupart des images. Par contre, les altitudes des MNT doivent être codées sur deux octets sous forme de nombres entiers. Ceci a nécessité le développement d'un programme de conversion de données depuis le format ascii (fichier XYZ) en un format d'entier codés sur deux octets (programme *xyztov3d.c*).

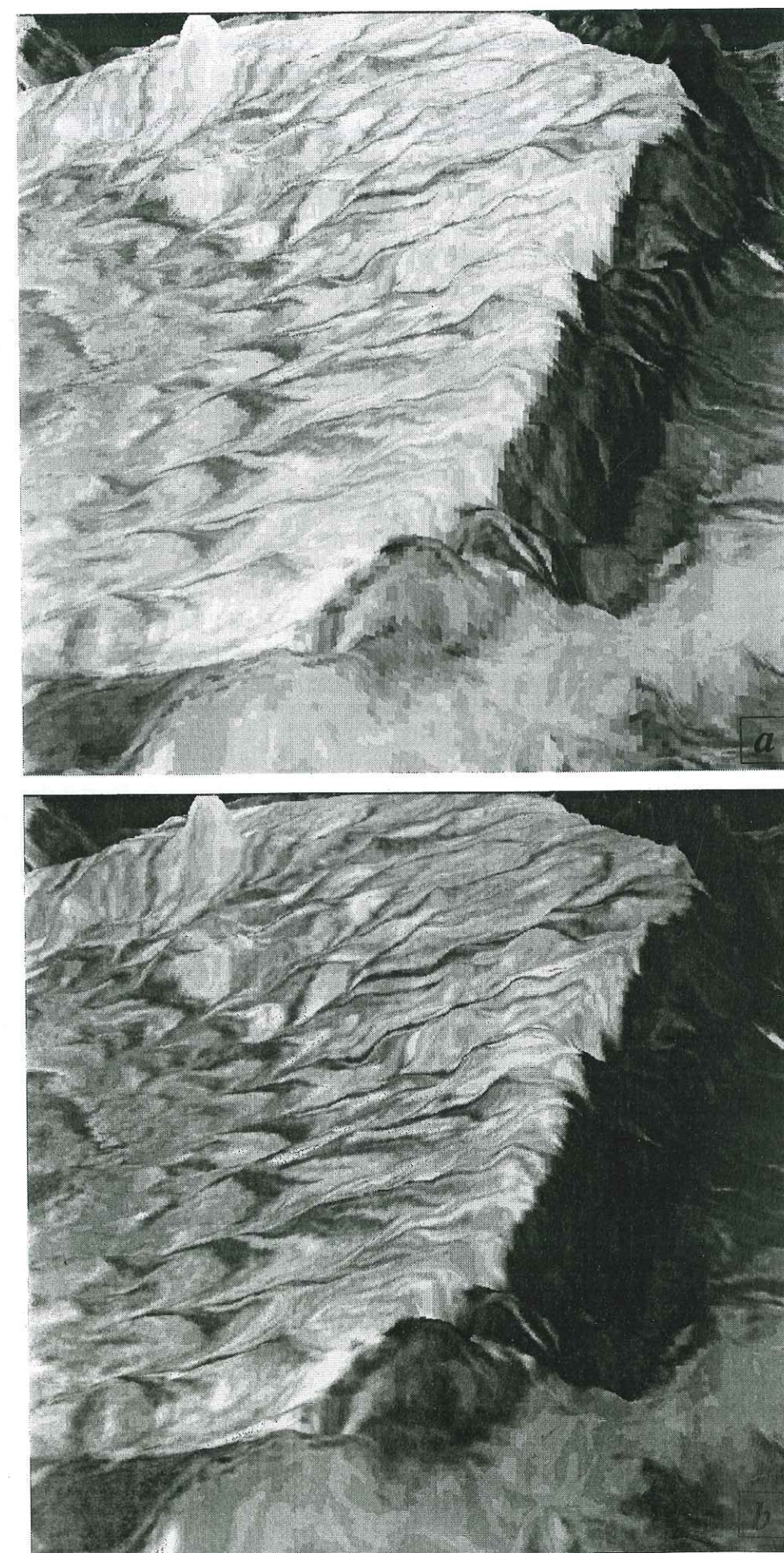
De plus, le logiciel XVUE3D permet de superposer seulement des images et des MNT dont les tailles sont multiples l'une de l'autre. Ceci implique de n'utiliser pour le calcul du MNT qu'une grille régulière dont le pas est un multiple entier de la résolution de l'image (image à 10 m et grille du MNT à 20 m par exemple).

Une autre limite à l'utilisation du logiciel est la taille maximale de l'image qu'il peut visualiser en pleine résolution. En effet, le logiciel possède une fenêtre de visualisation qui n'accepte que des images n'excédant pas une taille de 800 lignes par 800 colonnes. En pratique, une image de taille supérieure peut être visualisée mais le logiciel sous-échantillonne l'image avec un pas lui permettant de positionner celle-ci dans la fenêtre de visualisation (pas de possibilité de scrolling). Cette remarque est importante notamment si l'on réalise des mesures précises sur l'image ou sur la vue perspective. Lors de l'utilisation des MNT pour la mesure de paramètres géométriques associés aux blocs basculés (chapitre 5), cette limitation conduira à la réalisation d'extraits de taille inférieure à 800 par 800 points.

Enfin, quelques remarques concernant le rendu des images visualisées par XVUE3D sont nécessaires. En effet, le logiciel XVUE3D applique systématiquement un traitement de réhaussement des contrastes aux images qu'il visualise. Ce traitement n'est absolument pas maîtrisé par l'utilisateur. Ceci peut être gênant dans le cas de traitements spécifiques développés par l'utilisateur pour identifier certaines informations sur l'image. Par la suite, la réalisation de mesures sur les vues perspectives (marqueurs géologiques par exemple) devra donc être doublée d'un contrôle de la localisation des mesures directement sur l'image traitée par l'utilisateur.

Pour la réalisation des vues perspectives, XVUE3D réalise une triangulation des données topographiques et affecte ensuite une valeur de radiométrie aux centroïdes de chaque triangle. Avant l'affichage sur écran couleur, il réalise une interpolation des valeurs de radiométrie, pour améliorer le rendu général de l'image (figure II.18). Cette interpolation de l'image peut cependant être désactivée fournissant ainsi une image de moins bonne qualité mais plus précise quant à la localisation de chacun des pixels. Les mesures éventuelles sur les vues perspectives doivent être réalisées impérativement dans cette configuration afin de garder la précision initiale du MNT.

Figure II.18 Apport de l'interpolation pour le rendu des vues perspectives. a- Vue sans interpolation, b- Vue avec interpolation. La vue avec interpolation présente un rendu meilleur, mais il est impossible de localiser précisément les pixels.



II.3 Inversion des données microtectoniques

II.3.1 Méthode d'inversion utilisée

Le dernier type de données numériques utilisées au cours de cette thèse correspond aux mesures structurales réalisées sur le terrain. Ces mesures comportent la direction et le pendage de chaque plan de faille ainsi que le plongement des stries de mouvement mesurées sur chacun d'entre-eux. La reconstitution du tenseur de contraintes associé à une population de failles peut être envisagée, à partir de l'analyse des mesures structurales (direction, pendage des failles, plongement des stries) selon les relations contraintes-déformations décrites par Wallace [1951] et Bott [1959]. Selon Bott [1959], la direction du cisaillement maximum sur le plan de rupture correspond à la direction de la strie de mouvement sur le plan de faille. Cependant, la direction de la contrainte cisailante sur une faille dépend de l'orientation de ce plan par rapport aux contraintes principales et du rapport des valeurs de chaque contrainte. Une hypothèse supplémentaire est donc nécessaire pour reconstituer le tenseur de contraintes associé à une population de failles. Il faut que la contrainte régionale reste uniforme dans l'espace et dans le temps pour l'ensemble des failles analysées. Ces failles doivent donc se rapporter à un seul évènement tectonique.

La détermination du tenseur des contraintes a été envisagée :

- soit à partir de constructions graphiques comme la méthode des dièdres droits [Arthaud, 1969; Angelier et Mechler, 1977], permettant d'obtenir seulement les directions des contraintes principales,
- soit plus récemment à partir de méthodes numériques d'inversion des données structurales ou sismiques [Carey et Brunier, 1974; Carey, 1979; Angelier, 1983; Michael, 1984; Etchecopar et al, 1981; Etchecopar, 1984; Gephart et Forsyth, 1984; Carey-Gailhardis et Mercier, 1987], permettant de caractériser la forme de l'ellipsoïde des contraintes.

Compte-tenu des hypothèses de départ, ces diverses méthodes s'appliquent en théorie, aux cas des sites monophasés, dont la formation des failles dépend seulement d'une même contrainte régionale. Cependant, l'application de ces méthodes à des sites polyphasés fournit des résultats satisfaisants, à partir de critères de discrimination entre les divers plans de failles [Angelier et Manoussis, 1980; Armijo et al, 1982; Angelier, 1983; Etchecopar et Mattauer, 1988]. Ces résultats confirment, à posteriori, la possibilité d'utiliser ces méthodes pour de tels sites.

Le principe mathématique des méthodes d'inversion consiste en une série d'itérations au cours desquelles les opérations suivantes sont réalisées :

- définition préalable des valeurs du tenseur de contraintes,
- calcul d'une strie théorique sur un plan de faille donné,
- minimisation de l'écart angulaire entre la strie théorique et la strie mesurée sur ce plan de faille, le plus souvent par une méthode des moindres carrés.

Les divers programmes de calcul diffèrent principalement par :

- les possibilités de définition aléatoire ou dirigée des valeurs du tenseur des contraintes,
- les pourcentages d'erreur accordés lors de la minimisation des écarts angulaires,
- les possibilités d'itérations successives sur chaque plan de faille composant le site étudié,
- les capacités de tri des données dans le cas de multiphasage,
- ou encore le mode de représentation des résultats.

De ce fait, les résultats obtenus sur un même site peuvent varier, en raison des hypothèses sur les relations contraintes-déformations et des différentes méthodes employées [Gephart, 1990].

Au cours de ce travail, le programme d'inversion STRESS, mis au point par Michael [1984] a été utilisé pour analyser la population des failles mesurées sur le terrain. Ce programme, développé en langage C, fonctionne sur station de travail sous environnement X, et utilise pour la visualisation des résultats les facilités du package VPLOT (construction puis visualisation de graphiques ou stéréogrammes en Postscript). Le choix de ce programme d'inversion est motivé par l'équipement informatique du laboratoire des Sciences de la Terre de l'ENS Lyon où ont été traitées les données. Ce programme, comme la plupart des autres, repose sur les deux postulats suivants :

1. la contrainte générale reste uniforme au cours du temps et dans l'espace pour la région étudiée,
2. la direction de mouvement observée sur le plan de faille et matérialisée par les stries, correspond à la direction de la contrainte cisailante sur chacun des plans de faille [Bott, 1959].

La méthode mise au point par Michael [1984] pose une condition supplémentaire. La magnitude de la contrainte tangentielle est supposée identique sur les différents plans de faille, au moment de la rupture. Ceci permet de lever l'ambiguïté qui existe parfois lorsque la direction de la contrainte tangentielle est parallèle ou anti-parallèle à la direction de mouvement sur le plan de faille [Michael, 1984].

Compte-tenu des remarques précédentes sur la variabilité des résultats entre méthodes d'inversion différentes d'une part, et du peu de connaissance initiale de la méthode de Michael [1984] d'autre part, celle-ci a été confrontée aux méthodes proposées par Carey [1979] et par Etchecopar et al [1981], afin de préciser ses limites de validité.

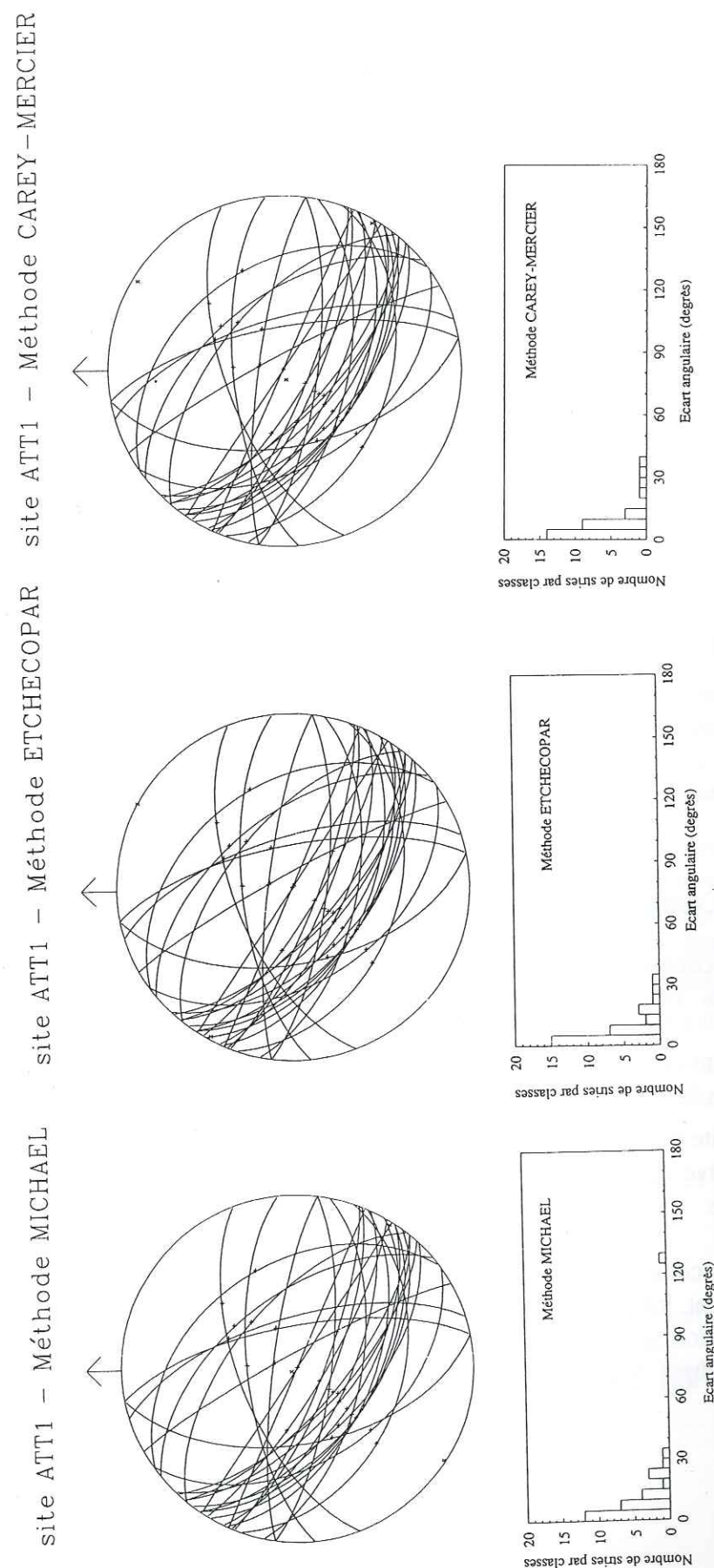
II.3.2 Comparaison de méthodes d'inversion

Les comparaisons ont été envisagées sur deux sites mesurés au cours de la mission de terrain au Yémen :

- un site simple, mesuré à At Turbah, au Sud de Taizz (figure III.8) avec une phase d'extension normale mise en évidence au préalable par la méthode graphique des dièdres droits,
- un site polyphasé, (dans le secteur de Umm Shatt sur la figure III.11) avec une chronologie relative établie sur le terrain à l'aide de stries superposées présentes sur certains plans de faille.

Pour chaque méthode de calcul, l'écart angulaire entre strie théorique et strie mesurée est analysé, et les valeurs de contraintes obtenues sont comparées. Pour le site polyphasé, la participation de chacune des stries au calcul des valeurs de contraintes a été analysée pour chaque phase et pour chaque méthode différente.

Figure II.19 Représentation des plans de faille et des stries associées en projection isosurface (canvas de Schmidt) et histogramme de répartition de l'écart angulaire des stries théoriques calculées pour ces plans, dans le cas du site monophasé.



Les résultats des calculs et l'écart angulaire entre les stries dans le cas du site monophasé sont représentés sur la figure II.19. Les valeurs numériques obtenues au cours des différents calculs sont portées dans le tableau II.20 :

Tableau II.20 Résultats comparés des méthodes d'inversion — site monophasé

	Méthode MICHAEL		Méthode CAREY-MERCIER		Méthode ETCHECOPAR	
	Direction	Pendage	Direction	Pendage	Direction	Pendage
$\sigma 1$	325	87	251	83	125	88
$\sigma 2$	124	3	121	3	300	2
$\sigma 3$	214	1	31	4	30	0.5
Φ	0.17		0.09		0.0003	

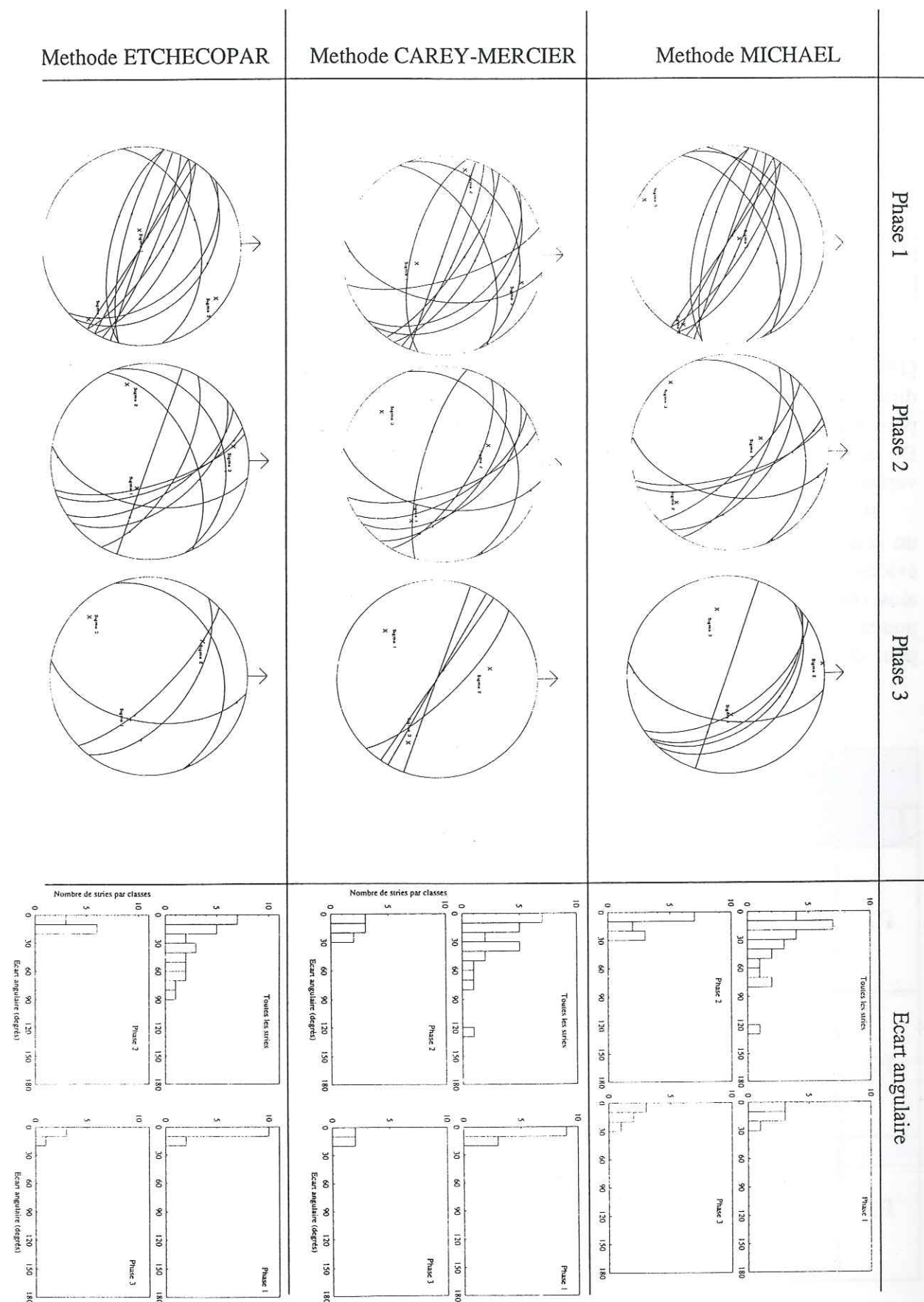
Dans ce tableau, comme par la suite, le paramètre Φ est utilisé selon la définition d'Angelier [1983] qui correspond au rapport entre $(\sigma 2 - \sigma 3)$ et $(\sigma 1 - \sigma 3)$. Pour chaque méthode, les direction et pendage de $\sigma 3$ sont cohérentes et donnent une extension normale orientée N30. De plus, les écarts angulaires obtenus sont faibles, et inférieurs à 20° pour chacune des méthodes. De même, les valeurs de Φ sont peu différentes. Pour ce cas simple, il n'existe donc pas de variations significatives entre les trois méthodes comparées.

Pour le site polyphasé, l'élimination systématique et itérative des stries calculées montrant un écart angulaire important (supérieur à 20°) avec les stries mesurées permet de mettre en évidence trois phases d'extension différentes et ceci avec les trois méthodes. Pour chaque phase ainsi obtenue, les valeurs des $\sigma 3$ sont reportées sur des canvas de Schmidt et les écarts angulaires présentés en parallèle (figure II.22). Le tableau II.21 donne les valeurs des contraintes calculées, pour chacune des phases et chacune des méthodes.

Tableau II.21 Résultats comparés des méthodes d'inversion — site polyphasé

		Méthode MICHAEL		Méthode CAREY-MERCIER		Méthode ETCHECOPAR	
		Direction	Pendage	Direction	Pendage	Direction	Pendage
P1	$\sigma 1$	332	77	166	68	265	76
	$\sigma 2$	120	10	285	11	128	11
	$\sigma 3$	211	7	19	18	36	10
	Φ	0.32		0.89		0.13	
P2	$\sigma 1$	334	62	117	35	116	66
	$\sigma 2$	137	27	336	47	255	18
	$\sigma 3$	231	7	222	21	350	15
	Φ	0.78		0.91		0.96	
P3	$\sigma 1$	86	58	224	29	116	51
	$\sigma 2$	263	32	348	45	327	34
	$\sigma 3$	354	1	115	31	226	16
	Φ	0.58		0.51		0.29	

Figure II.22 Représentation des plans de faille et des stries associées en projection isosurface (canvas de Schmidt) et histogramme de répartition de l'écart angulaire des stries théoriques calculées pour ces plans, dans le cas du site polyphasé.

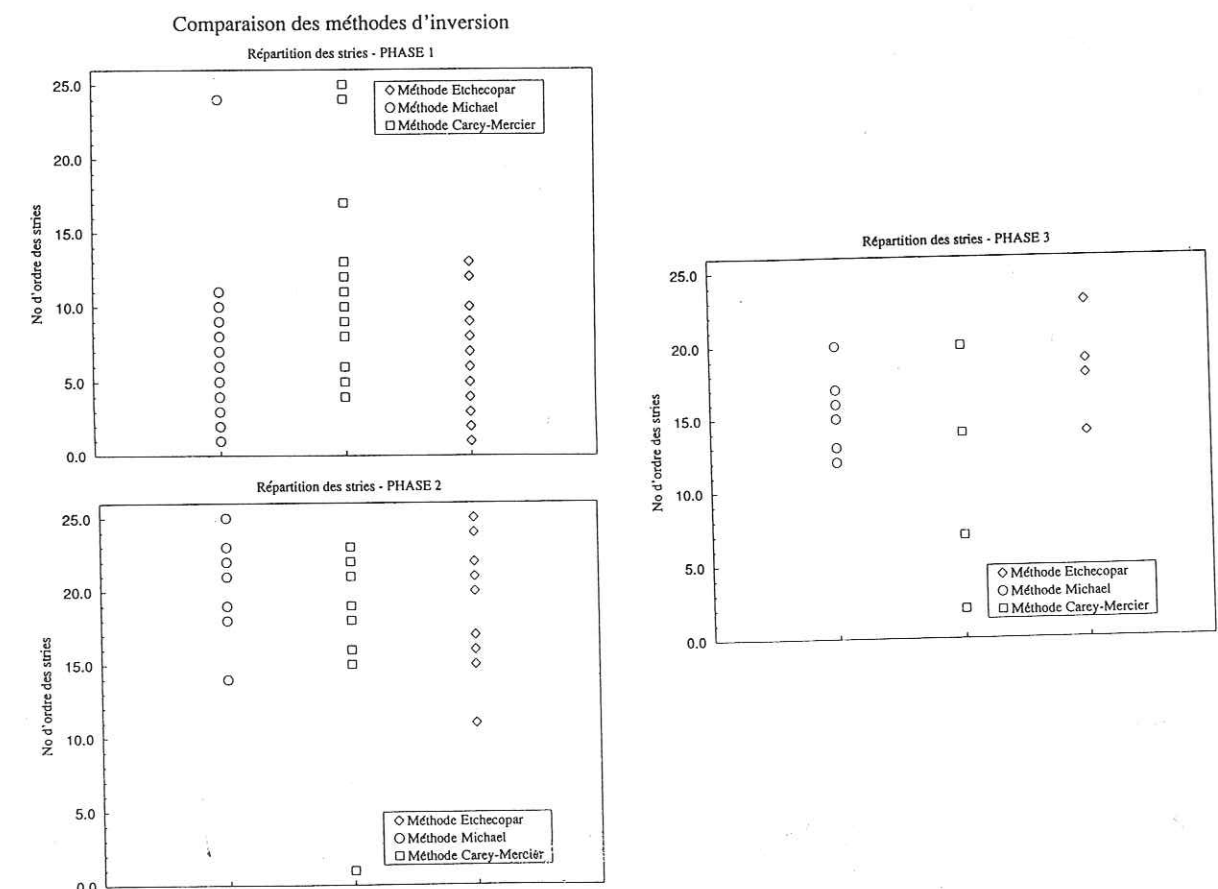


Les directions de σ_3 obtenues sont cohérentes entre les différentes méthodes. Les variations des valeurs de Φ d'une méthode à l'autre sont probablement liées aux équations mathématiques utilisées lors de l'inversion des données, mais également aux différences entre les failles qui participent au calcul du tenseur pour chaque phase. L'ordre de grandeur est cependant respecté (valeurs de Φ proches de 0 ou proches de 1), ce qui importe le plus pour interpréter les valeurs de contraintes obtenues. Les différences qui apparaissent sur chaque stéréogramme conduisent à analyser plus en détail la participation de chacune des stries aux trois phases. Pour ceci, les calculs d'inversion sont effectués en affectant un numéro d'ordre à chaque strie du fichier initial. Les résultats sont illustrés sur la figure II.23.

La répartition des données dans chaque phase diffère peu selon chacune des méthodes. Ainsi, les différences entre les méthodes portent sur quelques détails mais les résultats obtenus sont identiques. Ils sont également reproductibles en définissant au hasard l'ordre des stries dans le fichier de données. De plus, la chronologie entre les différentes phases, établie à partir de stries superposées mesurées sur le terrain, est identique pour chacune des trois méthodes.

Ces diverses comparaisons montrent qu'il n'existe pas de différences significatives dans les résultats obtenus par les trois méthodes comparées. Compte-tenu de l'équipement informatique du laboratoire, des facilités de traitement tant sur le plan du calcul (station de travail) que sur le plan de la visualisation des résultats (interface graphique VPLOT associée au traitement Postscript des dessins), la méthode proposée par Michael [1984] est retenue pour l'analyse structurale des sites géologiques analysés sur le terrain.

Figure II.23 Répartition des stries dans chacune des phases d'extension déterminées lors de l'analyse du site polyphasé.



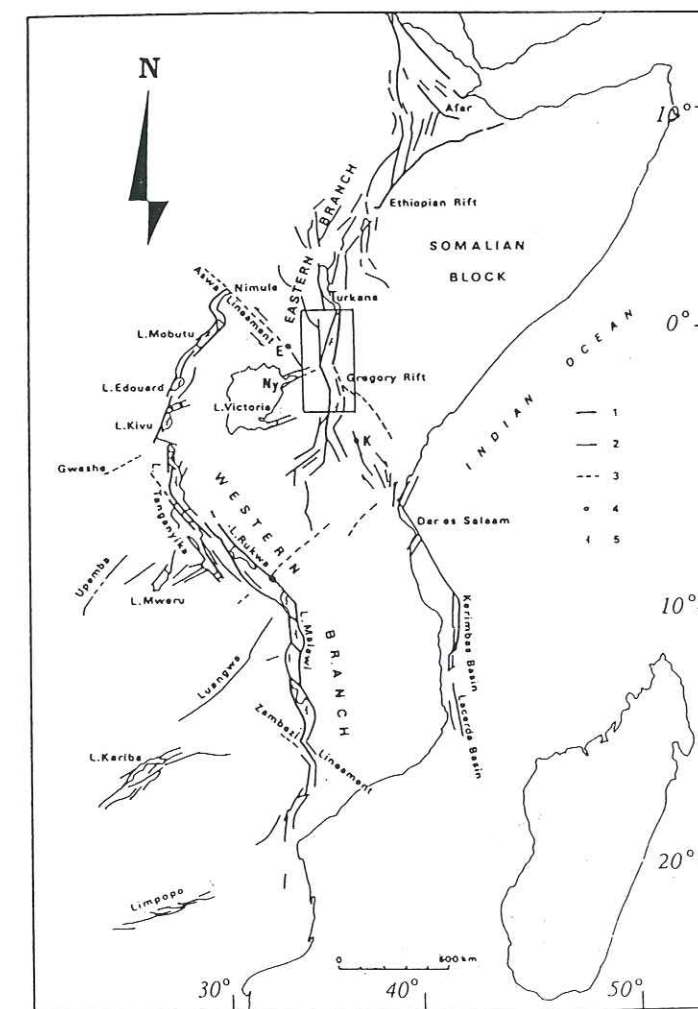
III

CADRE GEOLOGIQUE DES OBJETS ETUDIES

III Cadre géologique des objets étudiés

Au cours de ce travail, l'analyse de la déformation extensive s'effectue sur deux objets géologiques. Le premier est une portion du rift continental Est-africain, située au Kenya. Le second, situé au Yémen, correspond simultanément à la marge est de la Mer Rouge et à la marge nord du Golfe d'Aden. Ces deux objets sont différents dans leur stade d'évolution, mais ils présentent des déformations extensives comparables, exprimées sous la forme de failles normales et de décrochements. Le cadre géologique général est tout d'abord présenté pour chacun des deux objets. Une étude structurale approfondie complète les données sur la géométrie de la déformation continentale dans trois secteurs étudiés au Yémen.

Figure III.1 Schéma général du rift Est-africain [d'après Chorowicz et al, 1987]. Le cadre centré sur le Gregory Rift situe plus précisément le secteur étudié (E = Elgon; K= Kilimandjaro; Ny = Nyanza Rift).



III.1 Géologie du Gregory Rift (Kenya)

Le système du rift Est-africain se décompose en deux ensembles de part et d'autre du lac Victoria [Baker et al, 1972] :

- une branche occidentale qui s'étend du Zaïre au Mozambique,
- une branche orientale, traversant sur 2000 km environ, l'Ethiopie, le Kenya et la Tanzanie.

Cet ensemble se raccorde avec la partie ouest de la jonction triple Afar-Mer Rouge-Golfe d'Aden [Baker et Wollenberg, 1971; McKenzie et al, 1970; LePichon et Francheteau, 1978] au niveau du territoire des Afars (figure III.1).

La portion de rift étudiée au cours de ce travail se situe dans la partie kenyane du rift Est-africain, entre les lacs Baringo et Magadi. Elle est comprise entre 3°N et 2°S de latitude et entre 33°E et 36°E de longitude et porte le nom de *Gregory Rift*, du nom du géologue qui y fit les premières observations.

La topographie du secteur est assez particulière puisque les bords du rift s'élèvent jusqu'à plus de 3000 m alors que le plancher du rift culmine lui, aux environs de 2000 m. [McCall, 1967; Walsh, 1969; Baker et al, 1972]. De plus, l'altitude moyenne du rift au Nord-Kenya ou en Tanzanie est beaucoup moins élevée (de 600 à 1000 m). Cette topographie particulière s'explique par une structure en dôme de toute la partie kenyane du Gregory Rift [Baker et al, 1972], identique à celle décrite en Ethiopie [Mohr, 1962, 1987].

III.1.1 Cadre régional

Tableau III.2 Evènements géologiques principaux concernant le Gregory Rift.

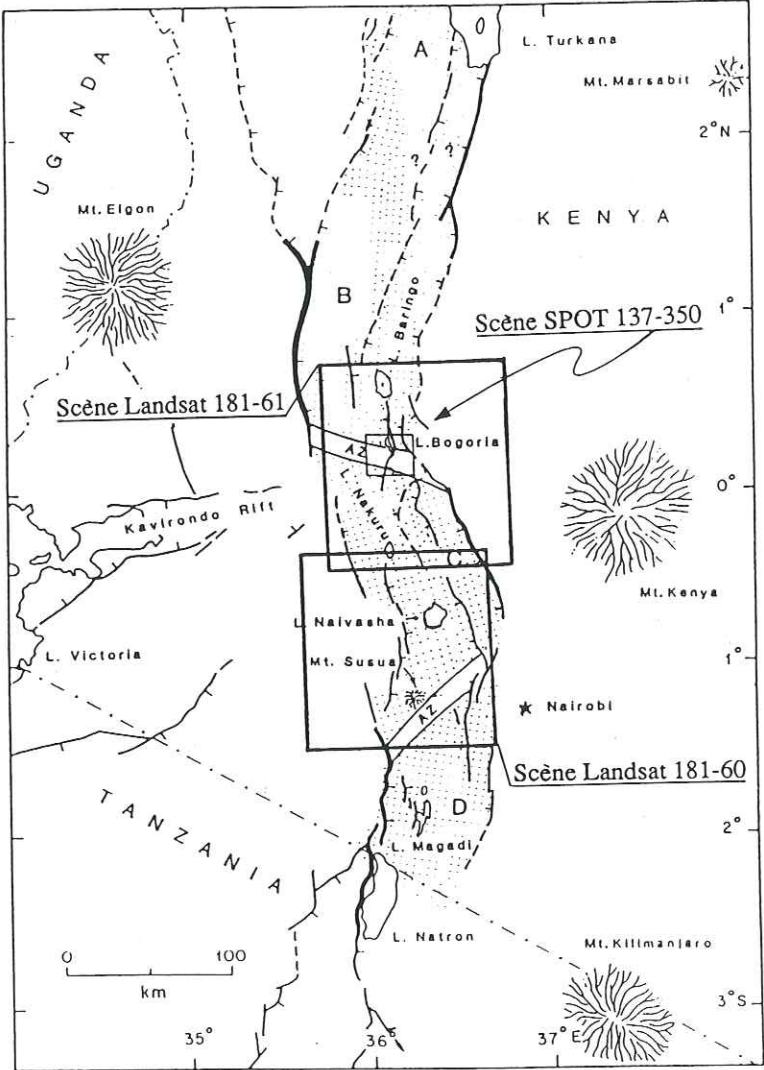
RECENT	Dépôts superficiels et lacustres (alluvions, travertins...) Mise en place d'édifices volcaniques (Menengai, Elmenteita ...)
PLEISTOCENE	Réactivation de failles Mise en place de roches volcano-sédimentaires et de coulées basaltiques 3ème phase majeure d'activité du rift
PLIOCENE	2ème phase majeure d'activité du rift Mise en place d'une grande quantité de produits pyroclastiques (Mau, Bahati ...) 1ère phase majeure d'activité du rift
MIOCENE	Basaltes et phonolithes (Rumuruti, Sattima ...) Premiers évènements tectoniques Mise en place des basaltes de la série de Samburu
MESOZOIQUE	Pas de mouvements tectoniques majeurs dans le Grégory Rift Mise en place de plusieurs surfaces d'érosion Développement de bassins dans la branche ouest du rift Est-africain
PALEOZOIQUE	Evènements tectono-métamorphiques liés à la mise en place de la ceinture orogénique du Mozambique (chevauchement majeur correspondant au linéament d'Assoua)

L'histoire géologique du Gregory Rift est essentiellement tertiaire (épisodes tectoniques majeurs et remplissage volcanique du rift) [Gregory, 1921; McCall, 1967; Walsh, 1969; Baker et Wollenberg, 1971; Baker et al, 1972, Vidal, 1985; Tiercelin et al, 1987]. Cette histoire est résumée en quelques points principaux dans le tableau III.2.

III.1.2 Géométrie des structures

Les structures liées au rifting sont décrites pour la première fois dans ce secteur par Gregory [1921]. Depuis, de nombreuses études structurales ont conduit à préciser leur géométrie sur l'ensemble du rift kenyan.

Figure III.3 Schéma structural du Gregory Rift d'après Verney Green et Meyer [1992]. Les bassins de Turkana (A), Baringo-Bogoria (B), Nakuru-Naivasha (C) et Magadi-Natron (D) sont séparés par des zones d'accomodation (AZ). Les cadres en trait continu correspondent aux zones couvertes par les images Landsat et SPOT.



Le rift d'une largeur moyenne de 70 km est bordé par des failles majeures d'orientation N0 à N10, réparties en-échelons [Baker et Wollenberg, 1971]. Ces failles sont marquées par des escarpements importants (de l'ordre de 1000 m) dus à des rejets verticaux cumulés importants. Elles constituent les premières structures mises en place et fonctionnent pendant toute la durée du rifting [Baker et al, 1972]. Sur l'ensemble du rift, ces failles délimitent des segments (ou sous-bassins) séparés par des zones de relais (figure III.3) constituées de systèmes de rampes inclinées [Walsh, 1969; Baker et al, 1972; Griffiths, 1980; Bosworth et al, 1986] formant des zones d'accomodation ou transformantes [Gibbs, 1984; Bosworth, 1987; Chorowicz et al, 1987;

Rosendhal, 1987; Ebinger, 1989; Nelson et al, 1989; Morley et al, 1990]. L'asymétrie de ces segments n'est que faiblement documentée dans la partie est du rift Est-africain [Baker et Wollenberg, 1971; Bosworth, 1987; Tiercelin et al, 1987; Morley et al, 1992] à la différence de la branche ouest où elle est bien décrite, par les études sismiques des différents lacs Tanganyika, Rukwa, ou Malawi au cours du projet PROBE notamment [Rosendhal et al, 1986; Ebinger et al, 1987; Rosendhal, 1987; Sander et Rosendhal, 1989; Rolet et al, 1991; Rosendhal et al, 1992].

Entre ces failles majeures, se répartissent des réseaux de failles normales à rejet plus faible (30 à 100 m), mais avec une densité de répartition plus élevée [McCall, 1967; Baker et al, 1972; Griffith, 1980]. Elles présentent, en carte, une courbure prononcée [McCall, 1967] et limitent des systèmes de blocs basculés [McCall, 1967; Griffith, 1980; Vidal, 1985; Tiercelin et al, 1987]. Ces failles sont orientées N0 à N10 et les plus récentes sont localisées principalement dans la zone centrale du rift [Vidal, 1985; Bosworth et al, 1986; Karson et Curtis, 1989].

Des structures obliques sur la direction moyenne du rift (failles normales et décrochements) sont décrites, de direction N60 dans le cas du Kavirondo Rift [Walsh, 1969; Baker et al, 1972; Bosworth et al, 1986] ou de direction N140 pour le linéament d'Assoua (zone de suture de l'orogénèse mozambique, traversant le Gregory Rift) et les structures associées [Walsh, 1969; Chorowicz et Mukonki, 1980; Vidal, 1985; Chorowicz et al, 1988]. Leurs interactions avec les failles normales du rift permettent le développement de structures particulières ("box fault systems") [Chenet et Letouzey, 1983; Gibbs, 1984] localisées principalement dans les zones d'accommodation [Griffith, 1980; Bahat, 1983; Vidal, 1985].

L'existence des structures obliques et leur chronologie de mise en place par rapport aux structures du rift pose la question de l'héritage tectonique [Baker et al, 1972; McConnell, 1980]. En effet, selon certains auteurs, certaines de ces structures, notamment celles d'orientation N140 (linéament d'Assoua par exemple), sont issues de la réactivation en extension d'anciennes structures compressives développées lors de l'orogénèse de la ceinture mozambique [McConnell, 1980; Vidal, 1985; Chorowicz et al, 1987; Piper, 1989; Chorowicz et al, 1988; Castaing, 1991; Smith et Mosley, 1993]. Cet héritage, encore discuté [Rosendhal et al, 1992; Chorowicz, 1992] semble toutefois plus important sur la branche est du rift Est-africain et particulièrement dans le secteur du Gregory Rift [Bosworth, 1987; Castaing, 1991; Chorowicz, 1992; Morley et al, 1992; Smith et Mosley, 1993].

Des études cinématiques réalisées sur la déformation extensive du Gregory Rift [Strecker et al, 1990; Castaing, 1991; Bosworth et al, 1992; Smith et Mosley, 1993] montrent un changement dans la direction d'extension entre le Pliocène (extension moyenne orientée N90) et le Pléistocène (extension moyenne orientée N135). Ce changement dans la cinématique de l'extension est également observé dans la branche ouest du rift Est-africain, au niveau du Malawi Rift [Chorowicz et Sorlien, 1992; Ring et al, 1992]. Certains auteurs relient l'association entre failles normales et décrochements observée dans le Gregory Rift, aux changements dans la cinématique de l'extension constatés soit au niveau du Gregory Rift [Chorowicz et al, 1987; Strecker et al, 1990; Bosworth et al, 1992], soit sur la branche ouest du rift Est-africain [Castaing, 1991; Chorowicz et Sorlien, 1992; Ring et al, 1992]. Smith et Mosley [1993] proposent quant à eux, une évolution de la déformation du Gregory Rift au cours du temps, en fonction de l'obliquité de la direction d'extension régionale sur les structures anciennes du socle. Ceci constitue un argument supplémentaire en faveur du rôle des directions structurales du socle pour l'accommodation de la déformation extensive.

Enfin, la plupart des travaux sur l'estimation de la quantité d'extension liée au rifting s'accordent pour proposer une valeur de 10 à 15% [Baker et al, 1972; Karson et Curtis, 1989; Morley, 1989; Specht et Rosendhal, 1989], peut-être légèrement sous-estimée en raison de

l'oblitération possible des structures par le remplissage volcanique du rift [Morley, 1992]. Ces valeurs sont inférieures à celles proposées par McKenzie et co-auteurs [1970] ou par LePichon et Francheteau [1978] et calculées par reconstruction cinématique de la position des plaques africaine et arabe. Selon Karson et Curtis [1989] ou Specht et Rosendahl [1989], ceci est lié à l'imprécision sur les points de repères choisis pour ces calculs cinématiques ou plus probablement au fait que les reconstructions cinématiques tiennent compte de la déformation lithosphérique alors que les estimations d'extension à partir de profils sismiques ou de l'expression des structures en surface, ne concernent que la déformation de la croûte supérieure.

III.1.3 Contexte géophysique

De nombreuses études gravimétriques et sismiques ont été menées sur l'ensemble du rift kenyan, pour en préciser la structure profonde.

Les données de gravimétrie montrent principalement une anomalie négative existant au centre du rift [McCall, 1967; Baker et Wollenberg, 1971; Bott, 1981; Swain et al, 1981].

L'étude de la sismicité générale du rift [Fairhead et Girdler, 1971; Maguire et Long, 1976; Long et Backhouse, 1976; Dhalheim et al, 1989; Henry et al, 1990; Green et Meyer, 1992] ou des études sismiques plus approfondies [Griffiths, 1972; Fairhead et Henderson, 1977; Rosendhal et al, 1986; KRISP, 1987; Khan et al, 1989; Verney-Green et al, 1991; KRISP, 1991; Achauer et al, 1992] mettent en évidence différents caractères :

- profondeur du Moho de l'ordre de 40 km sous les bords du rift et de l'ordre de 36 km sous l'axe,
- sismicité faible sur l'ensemble de la branche est du rift Est-africain, sauf dans le secteur central du Gregory Rift,
- existence en profondeur et sous l'axe du rift, de corps allongés à faible vitesse de propagation des ondes sismiques et de faible densité,
- profondeur de l'interface fragile-ductile estimée, par la profondeur des séismes notamment, à environ 12 km,
- variation du remplissage volcano-sédimentaire des zones d'accommodations jusqu'aux zones centrales respectivement de 2 à 6-7 km,
- activité hydrothermale importante au niveau du Gregory Rift notamment, et fort gradient thermique par comparaison avec celui de la branche ouest du rift Est-africain.

Les interprétations de ces données diffèrent quant au modèle crustal proposé pour ce rift et au mode de mise en place de la remontée asthénosphérique. Deux hypothèses co-existent :

- amincissement lithosphérique et remontée asthénosphérique associée [Baker et Wollenberg, 1971; Bott, 1981; Mohr, 1987], sous forme d'intrusions basiques [Baker et al, 1972], de sills [Henry et al, 1990] ou de dikes [Karson et Curtis, 1989], selon le principe d'un modèle en pure shear [Brun et Choukroune, 1981; Coward, 1986; Lister et al, 1991],
- remontée asthénosphérique par l'intermédiaire d'une faille de détachement profond [Bosworth, 1987] selon le modèle en simple shear de Wernicke [1985].

III.1.4 Problématique

Les travaux antérieurs mettent en évidence le découpage du Gregory Rift en plusieurs segments (bassins et zones d'accommodation) et définissent précisément sa structure profonde.

L'analyse du Gregory Rift, à partir d'images satellitaires, doit permettre de répondre à plusieurs objectifs :

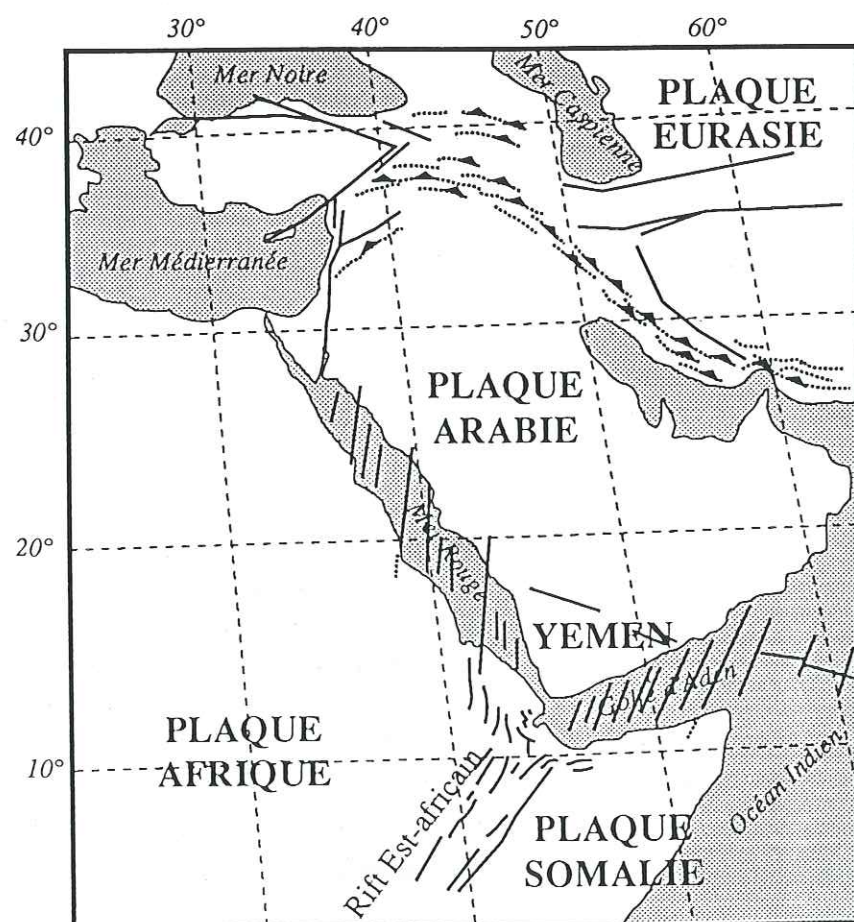
1. quantifier la répartition des structures fragiles et l'extension associée, entre les différents segments du rift,
2. préciser, dans cette répartition, l'importance et le rôle des structures héritées décrites dans certaines portions du rift,
3. valider dans un secteur bien décrit une analyse quantitative des structures fragiles par télédétection.

III.2 Géologie du Yémen

La République du Yémen regroupe depuis le 22 Mai 1990 l'ancienne République Arabe du Yémen ("Yémen du Nord") et l'ancienne République Populaire Démocratique du Yémen ("Yémen du Sud"). Elle se situe à l'extrémité sud de la péninsule arabique, entre 12°30 et 16° de latitude Nord et entre 43° et 46° de longitude Est. Sa physiographie se décompose principalement en trois zones :

- à l'ouest, en bordure de la Mer Rouge, la plaine côtière de la Tihama, qui se prolonge au sud en bordure du Golfe d'Aden,
- entre 44°E et 45°E, le Haut-Plateau qui culmine à plus de 3500m au nord du pays,
- et au nord-est, le Rub' Al-Khali ("Quart Vide"), zone désertique qui s'étend depuis l'Arabie Saoudite jusqu'au Golfe d'Aden.

Figure III.4 Localisation du Yémen sur la jonction triple.

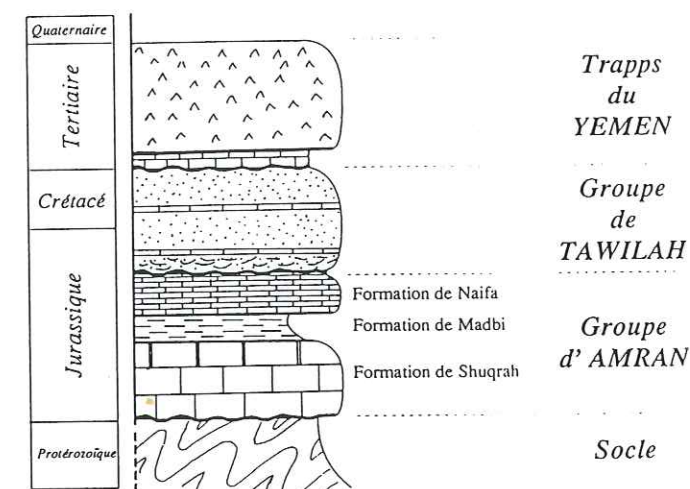


Le Yémen est bordé par deux rifts océaniques (Mer Rouge et Golfe d'Aden) reliés à la branche est du rift Est-africain (figure III.4). Il appartient à la plaque arabe, en bordure nord-est de la jonction triple de type RRR définie par McKenzie et Morgan [1970] entre les plaques africaine, arabe et somalienne. De part sa position particulière en bordure de cette jonction triple entre trois plaques continentales, le Yémen constitue ainsi un lieu privilégié pour l'analyse de la déformation extensive continentale associée au rifting Mer Rouge - Golfe d'Aden.

III.2.1 Cadre régional

La géologie du Yémen est présente des séries sédimentaires et volcaniques datées du Paléozoïque à l'Actuel, discordantes sur le socle panafricain. Ces formations géologiques sont illustrées pour leur répartition temporelle sur la figure III.5, et pour leur répartition spatiale, sur la figure III.6.

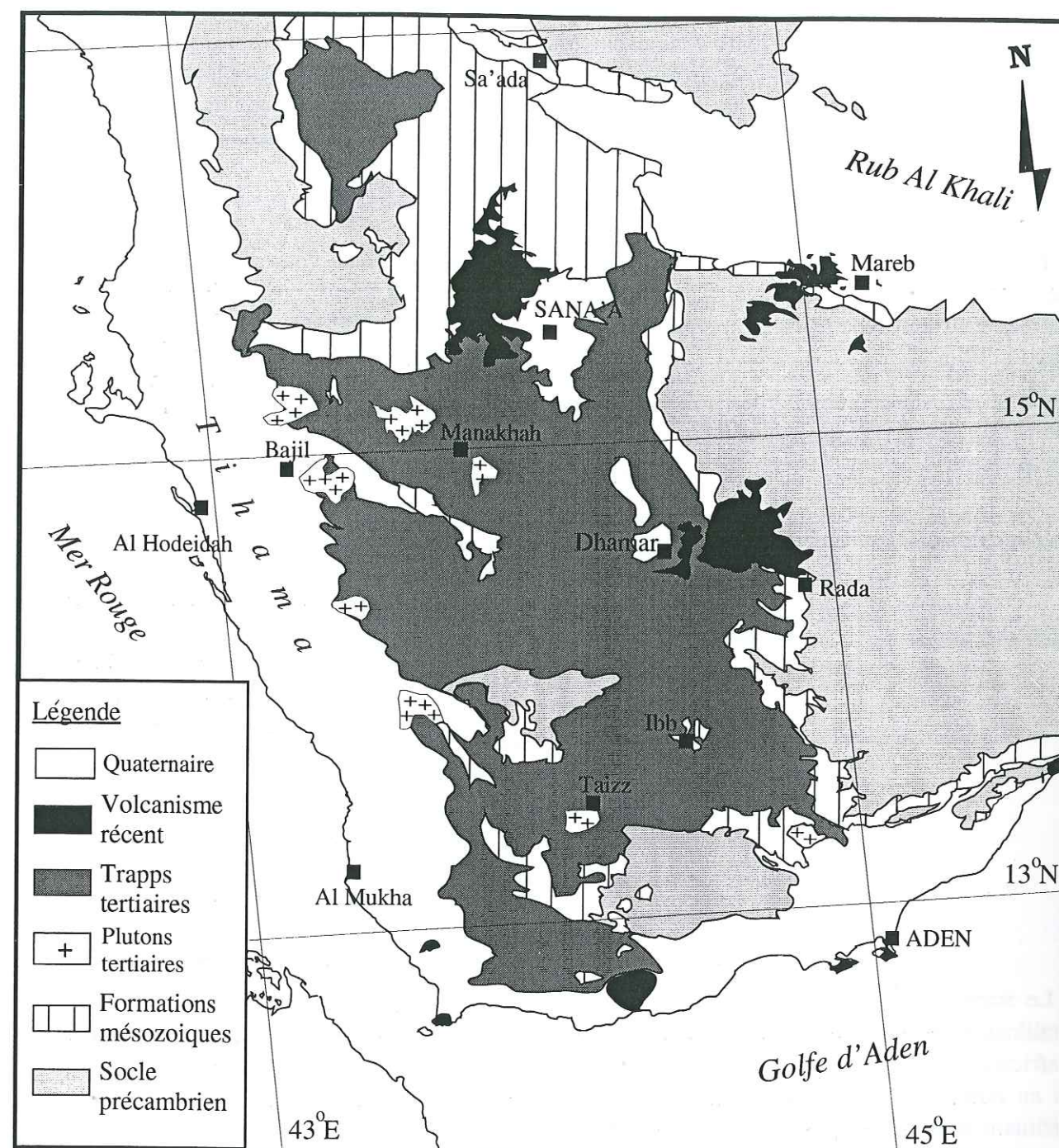
Figure III.5 Colonne stratigraphique simplifiée des formations géologiques couvrant l'ensemble du Yémen, d'après Tard et al [1991] et Menzies et al [1992].



Le socle qui affleure essentiellement dans la partie Est du Yémen, est formé de roches cristallines et métamorphiques datées du Protérozoïque, déformées au cours de l'orogénèse panafricaine [Lamare, 1930; Greenwood et Beackley, 1967]. Par analogie aux roches décrites plus au nord, en Arabie notamment, ces roches métamorphiques sont rattachées aux roches constituant le bouclier arabe [Greenwood et Beackley, 1967; Engel et al, 1980; Duyverman et al, 1982].

Ce socle est recouvert en discordance par des formations paléozoïques à cénozoïques constituées d'alternances de dépôts marins et continentaux [Greenwood et Beackley, 1967; P.D.R.Y. geological Maps 1983-1987; Jungwirth 1990; Menzies et al, 1990; Huchon et al, 1991; Tard et al, 1991]. Le Jurassique terminal est caractérisé par d'épaisses séries calcaires transgressives qui forment les séries du "Groupe d'Amran" [Lamare, 1930; Geukens, 1960; Greenwood et Beackley, 1967]. Du Crétacé au Paléocène, les séries du "Groupe de Tawilah" se mettent en place [Geukens, 1960; Greenwood et Beackley, 1967; Menzies et al, 1990; Tard et al, 1991], constituées par des sédiments marins montrant une tendance de plus en plus nette à l'émersion. Dans ces séries, des surfaces d'érosion sont décrites directement sur les séries jurassiques (Nord-Est d'Aden).

Figure III.6 Carte géologique simplifiée du Yémen, d'après Huchon et al [1991], Tard et al [1991] et Menzies et al [1992].



Après la mise en place de ces séries sédimentaires, une épaisse série volcanique se développe. Elle correspond aux trapps du Yémen [Geukens, 1960], série de plus de 2 500 mètres d'épaisseur [Moseley, 1969; Chiesa et al, 1983], qui s'étend sur 40 000 km² environ, pour former le plateau yéménite. Ces trapps sont principalement représentés dans la partie ouest du Yémen et disparaissent aux environs de 45° de longitude Est. Ils correspondent à une série volcanique bimodale de basaltes et d'ignimbrites [Moseley, 1969; Gass, 1970; Chiesa et al, 1983; Chazot et al, 1991]. Les études pétrologiques, géochimiques et géochronologiques réalisées sur ces trapps, par des équipes italiennes [Civetta et al, 1978; Chiesa et al, 1983; Chiesa et al, 1989; Manetti et al, 1990] et françaises [Chazot et al, 1991; Chazot, 1993; Zumbo et al, soumis], expliquent ces variations chimiques lors de leur formation, par l'action combinée des processus

de cristallisation fractionnée et de contamination crustale. Ces événements magmatiques débutent à l'Oligocène, vers 30 Ma et se terminent au Miocène, vers 18 Ma. Cette chronologie des événements magmatiques est encore discutée. Les auteurs distinguent une mise en place continue de ces trapps [Menzies et al, 1992; Zumbo et al, soumis] ou en deux phases distinctes [Chiesa et al, 1983; Manetti et al, 1990]. Vers 20 Ma, se mettent en place des produits intrusifs (plutons granitiques, dykes basiques), surtout dans la partie ouest du Yémen [Greenwood et Beackley 1967; Capaldi et al, 1987a, 1987b; Huchon et al, 1991; Mohr, 1991; Coleman, 1992]. Les dykes sont d'orientation N120 à N140 surtout au sud du Yémen alors que leur orientation plus au nord est plutôt N10 à N170 [Moseley, 1969; Huchon et al, 1991; Mohr, 1991].

Au Miocène supérieur, des séries volcaniques alcalines se développent au Nord-Yémen [Capaldi et al, 1987c] mais également en bordure du Golfe d'Aden [Cox et al, 1969; Gass, 1970; Mallick et al, 1990; Huchon et al, 1991] pour former une ligne de volcans centraux connue sous le nom de "ligne d'Aden". Les événements magmatiques les plus récents sont datés du Plio-Quaternaire et sont responsables de la mise en place d'édifices volcaniques bien visibles autour de Sana'a, Mareb, au nord, et Dhamar, Rada ou Shuqra, plus au sud [Chiesa et al, 1983; Huchon et al, 1991; Chazot, 1993].

III.2.2 Géométrie des structures

Les études structurales réalisées sur le Yémen concernent essentiellement le Nord du pays [Grolhier et Overstreet, 1978; Chiesa et al, 1983; Huchon et al, 1991]. Des études dont certaines récentes existent toutefois sur le Sud-Yémen [Geukens, 1960; Greenwood et Beackley, 1967; Tard et al, 1991]. Pour replacer ces différentes études dans un contexte général et pour décrire la géométrie des déformations à petite échelle, une carte structurale synthétique a été élaborée, à partir de l'interprétation d'une mosaïque d'images Landsat TM au 1/500 000, couvrant l'ensemble du Yémen (figure II.5). Cette carte permet également de définir les secteurs qui feront l'objet d'une étude de détail. La figure III.7 est une reproduction de la mosaïque d'images Landsat TM.

Sur la figure III.8, interprétation structurale de cette mosaïque, seules les structures fragiles ou ductiles les plus importantes ainsi que les limites des diverses formations géologiques sont reportées. Les indications de pendage dans les zones de blocs basculés, les édifices volcaniques importants, et les plutons.

L'analyse détaillée de cette carte structurale et des données cartographiques disponibles sur le Yémen [Grolhier et Overstreet, 1978; Chiesa et al, 1983; Huchon et al, 1991] permet de regrouper l'ensemble des structures fragiles (failles, décrochements) ou ductiles (shear zones), selon trois orientations principales qui sont détaillées ci-dessous.

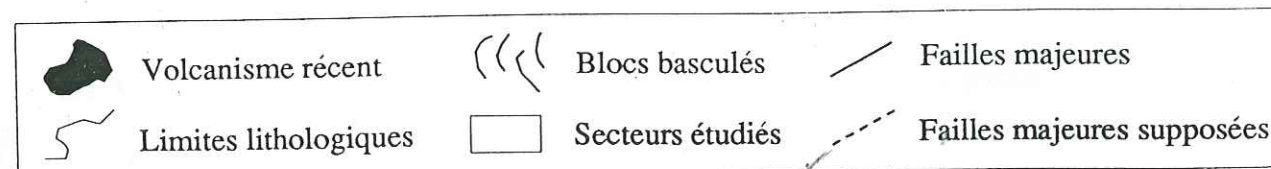
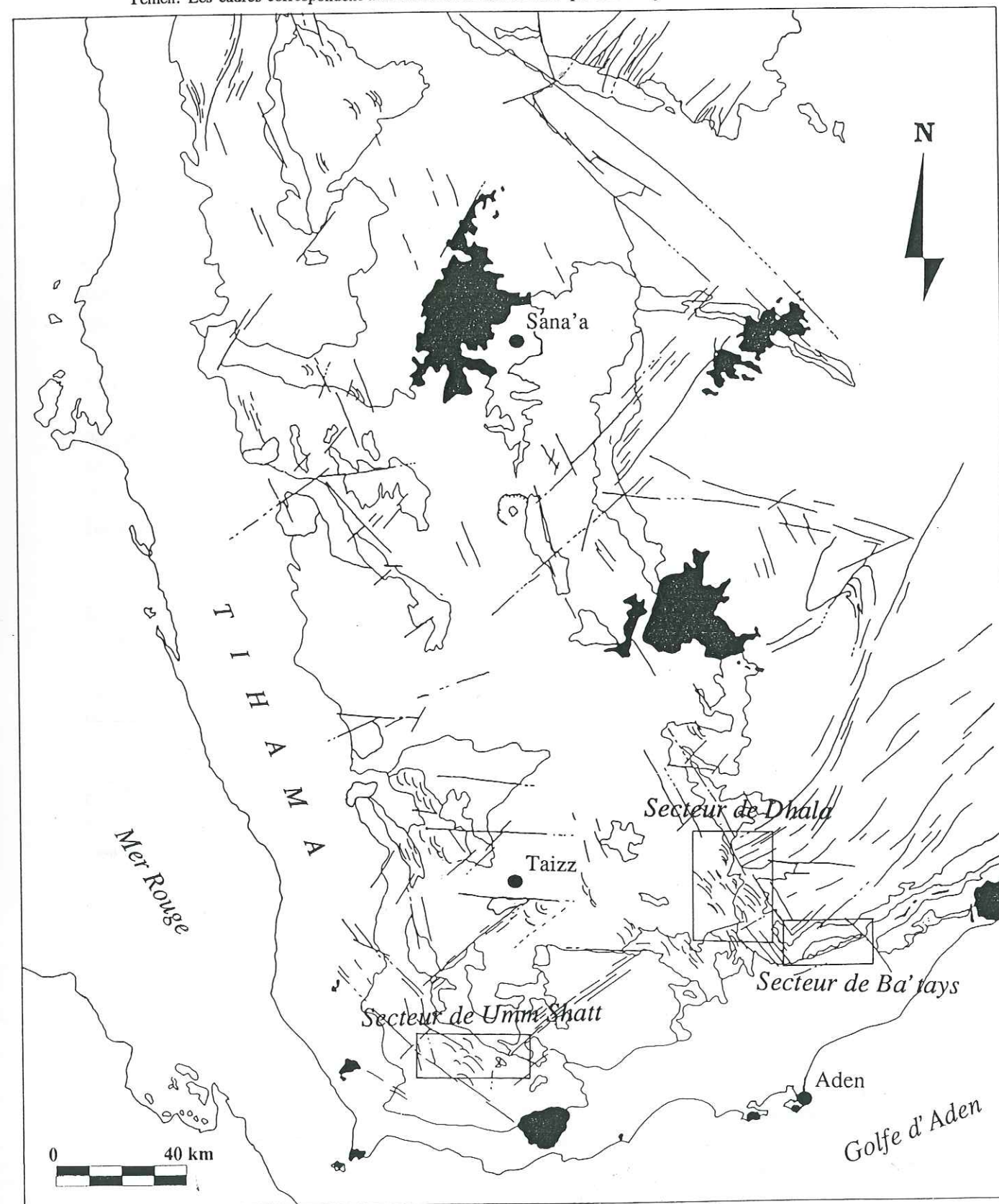
2.2.1 Structures orientées N40 à N70

A l'est de 45° de longitude Est, ces structures sont localisées dans le socle panafricain. Elles correspondent à des shear zones et des plis isoclinaux kilométriques mis en place lors de l'orogénèse panafricaine [Geukens, 1960; Greenwood et Beackley, 1967] et bien visibles sur les images. Greenwood et Beackley [1967] décrivent également dans ces affleurements de socle, une foliation orientée N40 à N50, subverticale, et soulignée par des alternances plurimétriques de micaschistes et de gneiss. Cette alternance, régulière et développée sur l'ensemble des affleurements, est repérable sur les images Landsat TM, sous la forme d'une juxtaposition régulière de pixels à radiométrie contrastée (figures III.7, III.9a, III.12a, III.14a).



Figure III.7 Mosaïque d'images Landsat TM sur le Yémen.

Figure III.8 Interprétation structurale réalisée à partir de la mosaïque d'images Landsat TM au 1/500 000 focalisées sur le Yémen. Les cadres correspondent aux secteurs du Sud-Yémen qui font l'objet d'une étude structurale détaillée.



Des failles N40 à N70, recoupent des formations plus récentes comme les séries mésozoïques et les trapps (figures III.6 et III.8). Au sud-est de Taizz, ou à l'ouest de Sana'a, ces structures, d'orientation moyenne N40, sont principalement décrochantes [Chiesa et al, 1983; Huchon et al, 1991] et situées dans le prolongement des structures ductiles présentes dans le socle.

Au nord-est d'Aden, ces structures sont plutôt orientées N70, et correspondent à des failles normales qui limitent des séries sédimentaires mésozoïques basculées de 35° environ vers le Sud-Ouest [Beydoun, 1960; Greenwood et Beackley, 1967; Jungwirth, 1990; Tard et al, 1991]. De nombreux auteurs s'accordent à reconnaître que ces failles normales ou ces décrochements se mettent en place à la faveur de réactivation d'anciennes structures pré-existantes [Greenwood et Beackley, 1967; Berhe, 1986; Dixon et al, 1987; Huchon et al, 1991; Tard et al, 1991].

Enfin, les failles transformantes décrites par divers auteurs en Mer Rouge ou dans le Golfe d'Aden [Cochran, 1981; Izzeldin, 1987; Bohannon, 1986; Choukroune et al, 1986; Coleman et al, 1988] sont d'orientation N30. Cette direction est proche de celles des structures ductiles développées au panafricain et réactivées par la suite.

2.2.2 Structures orientées N90 à N100

Les failles regroupées sous ces orientations, principalement décrochantes, affectent tous les types de terrains et semblent donc tardives (figures III.6 et III.8). Elles sont cependant peu représentées dans les trapps, et apparaissent surtout au sud de 14° de latitude Nord [Greenwood et Beackley, 1967; Huchon et al, 1991]. Elles mettent fréquemment en contact le socle et les séries sédimentaires ou les trapps (Est de Taizz, Est de Dhala), ce qui implique des rejets verticaux importants (parfois plus de 1000 m).

2.2.3 Structures orientées N120 à N140

Sur les images Landsat TM couvrant le Yémen, ces structures d'orientation sub-parallèle à l'allongement de la Mer Rouge, sont les plus représentées. Deux structures majeures apparaissent sur l'interprétation structurale (figure III.8). La première s'étend de Sa'ada à Mareb, et met en contact des roches du socle panafricain et des séries mésozoïques. Orientée N130, elle constitue le prolongement au Yémen d'un accident décrochant dont le sens dextre est visible sur les images Landsat TM. Cet accident découpe le sud du bouclier arabe et se termine au Sud-Est du Yémen par le fossé d'effondrement de Al Mukalla. Certaines études relient cet accident au "Nadj Fault System" qui correspond à une zone de suture orogénique panafricaine [Greenwood et Beackley, 1967; Hussein, 1988; Jungwirth, 1990].

La deuxième de ces structures majeures correspond au fossé développé entre Bajil et Aden (figure III.8). Il est limité par des failles normales N120 à N140 qui mettent en contact le socle et les séries sédimentaires ou les trapps volcaniques (région de Dhala), ou directement les séries sédimentaires et les trapps (Sud-Est de Bajil). Ce fossé semble jouer le rôle de zone de transfert, principalement au nord-ouest d'Aden où il est bien étudié [Greenwood et Beackley, 1967; Tard et al, 1991].

D'autres structures regroupées sous ces orientations apparaissent sur la carte interprétative. Elles correspondent à des failles normales qui limitent des systèmes de blocs basculés (secteurs au nord-est de Sana'a, au sud-ouest de Taizz et au nord-ouest d'Aden). Localement, ces structures sont associées à des décrochements orientés N160 et leur orientation, surtout au Sud-Yémen est plus proche de N120.

2.2.4 Extension associée

L'extension associée au développement de l'ensemble des structures fragiles décrites n'est

pas réellement quantifiée au Yémen. Des études sur la côte ouest de l'Arabie [Bohannon, 1986] estiment l'extension continentale aux environs de 10 à 15%. Elle est toutefois difficile à quantifier précisément en raison notamment de l'abondance de produits intrusifs. La part d'extension liée aux dykes n'est probablement pas négligeable [Bohannon, 1989; Mohr, 1991].

III.2.3 Données géophysiques

Les études géophysiques réalisées sur le Yémen sont peu nombreuses. Les travaux de sismique-réfraction en Arabie réalisés par Mooney et co-auteurs [1985] situent la profondeur du Moho à 38–45 km sous le bouclier arabe et à 8–15 km à proximité de la Mer Rouge. Pour le Golfe d'Aden, des études de sismique off-shore précisent la géométrie de bassins sédimentaires au large d'Aden, asymétriques, sub-parallèles à la direction d'allongement du Golfe d'Aden et découpés latéralement par une zone de transfert orientée N140 [Tard et al, 1991]. Cette zone est située dans le prolongement du fossé N140 entre Dhala et Aden.

Des études paléomagnétiques [Irving et Tarling, 1961; Tarling et al, 1967] montrent l'existence d'une rotation anti-horaire de 7° de la plaque arabe par rapport à la plaque africaine, à partir de l'analyse de basaltes de la ligne d'Aden. Ces analyses sont cependant discutées compte-tenu de l'existence de basculements tectoniques induisant des variations locales sur les résultats [Kellog, 1983; Acton et al, 1991].

Enfin, des séismes historiques associés à la répartition Nord-Sud des édifices volcaniques près de Dhamar [Huchon et al, 1991] confirment l'existence d'une activité tectonique actuelle dans cette région du Yémen.

L'ensemble de ces données, combiné aux diverses études structurales, conduit divers auteurs à proposer des modèles d'évolution des marges de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden. [Bohannon, 1986, 1989; Acton et al, 1991; Mohr, 1991; Tard et al, 1991; Jestin et Huchon, 1992]. Ces modèles correspondent à des applications des modèles de rifting actif ou passif [Sengör et Burke, 1978] sur la marge "Mer Rouge" ou la marge "Aden". Ils sont basés sur :

- un rôle important joué par la remontée de l'asthénosphère (rifting actif) comme le modèle de White et McKenzie [1989],
- l'existence de failles de détachement en profondeur (rifting passif) comme par exemple les modèles de Bohannon [1986] ou de Dixon et co-auteurs [1989] basés sur le modèle de Wernicke [1985] ou le modèle de Tard et co-auteurs [1991] basé sur la définition de Mutter et co-auteurs [1988].

Tous ces modèles sont basés sur les chronologies établies entre magmatisme et extension. Celle-ci est encore soumise à discussion et il semble que le modèle correspondant aux marges de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden soit plus complexe que l'un ou l'autre des modèles déjà proposés [Dixon et al, 1989; Tard et al, 1991; Menzies et al, 1992].

III.2.4 Chronologie des déformations au Yémen

Après l'orogénèse panafricaine, les premiers événements tectoniques correspondent au développement, au Sud-Est du Yémen et à l'Oxfordien, de bassins en transpression, limités par des failles normales de direction moyenne N70, sub-parallèles aux directions structurales du socle [Beydoun, 1960; Greenwood et Beackley, 1967; Tard et al, 1991]. Dans ces bassins, Beydoun [1960] et plus récemment Jungwirth [1990] ou Tard et co-auteurs [1991], proposent localement, l'association entre fracturation et plissement.

Les événements tectoniques majeurs qui succèdent à la déformation jurassique se décomposent en plusieurs phases tectoniques. Leur chronologie par rapport à la mise en

place de l'épaisse série des trapps du Yémen est encore discutée [Menzies et al, 1990; Huchon et al, 1991; Menzies et al, 1992]. On distingue tout d'abord une phase extensive est-ouest, vers 30 Ma, à laquelle sont associés des dykes nord-sud dans la région de Al Hodeidah notamment [Huchon et al, 1991; Mohr, 1991]. Vers 22 Ma, il se produit un changement important dans la cinématique de l'extension, avec le fonctionnement d'une phase extensive nord-sud [Huchon et al, 1991]. Cette phase semble contemporaine de la mise en place de plutons intrusifs [Capaldi et al, 1987b; Menzies et al, 1990; Huchon et al, 1991; Mohr et al, 1991; Coleman, 1992; Zumbo et al, soumis]. Elle est suivie d'une phase majeure, orientée N30 à N50 et qui semble se retrouver sur l'ensemble du Yémen, du Miocène moyen au Miocène supérieur (18 Ma – 10 Ma environ) [Huchon et al, 1991; Tard et al, 1991]. Elle est associée au développement de réseaux de dykes d'orientation "Mer Rouge" [Chiesa et al, 1989; Mohr, 1991; Tard et al, 1991]. Ces phases extensives oligo-miocènes sont postérieures au volcanisme entraînant la mise en place des trapps [Menzies et al, 1992] même si par endroits, il existe quelques évidences d'extension syn-volcanisme voire même anté-volcanisme [Hempton, 1987; Huchon et al, 1991]. Enfin, au Quaternaire, Huchon et co-auteurs [1991] envisagent l'existence d'une phase extensive est-ouest.

L'analyse de données gravimétriques [Courtilot, 1982; Choukroune et al, 1986] et cinématiques [LePichon et Francheteau, 1978; Gaulier et Huchon, 1991; Jestin et Huchon, 1992] sur la Mer Rouge et le Golfe d'Aden situent l'ouverture de ces deux océans, probablement synchrone [LePichon et Gaulier, 1988], vers 13 Ma. L'anomalie magnétique la plus récente est datée de 10 Ma dans le Golfe d'Aden [Cochran, 1981] et de 6 Ma dans la Mer Rouge [Izzeldin, 1987]. Enfin, des études cinématiques estiment les vitesses de déplacement actuel de l'ordre de 3 mm/an entre Afrique et Somalie, et de l'ordre de 18 mm/an entre Arabie et Somalie. Elles montrent que ces vitesses ont peu varié en direction, au cours du temps [Gaulier et Huchon, 1991; Jestin et Huchon, 1992].

III.2.5 Problématique

Cette revue des travaux antérieurs montre que le cadre géologique général du Yémen est encore assez mal connu. La réalisation d'une carte structurale interprétative, à partir des images Landsat TM au 1/500 000 permet de préciser le cadre tectonique de l'ensemble du Yémen. Cependant, les déformations extensives, bien décrites dans la partie Nord du pays, sont moins bien définies sur la marge sud du Yémen. L'analyse structurale de cette marge envisagée au cours de ce travail, à partir d'images satellitaires, de données topographiques et de données de terrain, répond à deux objectifs :

1. préciser la géométrie des structures extensives sur la marge sud du Yémen,
2. quantifier la cinématique de l'extension sur cette marge, après restauration des structures dans leur état ante-déformation.

III.3 Extension sur la marge sud du Yémen

Le premier objectif de l'analyse structurale de la marge sud du Yémen correspond donc à la description précise de la géométrie des structures extensives. L'acquisition préalable de données structurales est indispensable. Elle est réalisée sur trois secteurs, à partir de données de terrain, de l'interprétation d'images satellitaires Landsat TM et SPOT et de données topographiques précises.

III.3.1 Définition et localisation des secteurs d'étude

Les trois secteurs de blocs basculés étudiés ont été choisis à partir de l'interprétation structurale des images Landsat TM au 1/500 000 (figure III.8).

Le premier secteur situé au sud-ouest du Yémen (*secteur de Umm Shatt*) est choisi en raison de sa position particulière entre Mer Rouge et Golfe d'Aden. Il permet d'aborder les influences respectives de chacune des ouvertures océaniques sur la déformation continentale. Le deuxième secteur (*secteur de Dhala*) est situé en bordure du fossé N140 qui découpe le sud du Yémen et auxquels divers auteurs [Tard et al, 1991] attachent un rôle important dans la structuration de cette marge. Le troisième secteur analysé (*secteur de Ba'tays*) est situé à l'est de ce fossé N140.

Chacun des secteurs étudiés présente des systèmes de blocs basculés qui se développent dans les séries sédimentaires mésozoïques et les séries volcaniques oligo-miocènes. Des affleurements de socle panafricain montrant une structuration ancienne sont présents dans chacun des trois secteurs. Ceci permettra d'analyser les relations entre les structures néoformées liées à l'extension et les structures héritées de l'orogénèse panafricaine.

Enfin, les failles limitant les blocs basculés montrent une vergence particulière dans ces secteurs. Dans les secteurs de Umm Shatt et de Ba'tays, ces failles ont un pendage vers le Nord limitant ainsi des blocs basculés en direction de l'océan (Mer Rouge ou Golfe d'Aden). Le secteur de Dhala couvre quant à lui, une partie du fossé N140. On y observe des petits systèmes de horsts et grabens avec une prépondérance nette des failles à vergence vers l'extérieur du fossé.

Les caractéristiques structurales de chaque secteur sont analysées à partir d'images Landsat TM et SPOT (figure II.5) et à l'aide de données de micro-tectoniques récoltées au cours d'une mission de terrain entre Novembre et Décembre 1991. Une carte structurale établie par imagerie, et complétée par les données de terrain, est réalisée pour chaque secteur. Sur ces cartes, les principales structures sont reportées, ainsi que les limites lithologiques des diverses formations, le pendage des blocs basculés, les traits morphologiques majeurs (escarpements importants, caldeiras, ...), et les sites les plus représentatifs ayant fait l'objet d'une analyse microstructurale.

III.3.2 Analyse structurale des secteurs choisis

3.2.1 Secteur de Umm Shatt

Dans ce secteur (figure III.9), on retrouve à l'affleurement les différentes séries caractérisant la géologie du Yémen :

- le socle panafricain, dans la partie est (en violet sur la figure III.9a),
- la couverture sédimentaire correspondant à la série Crétacé et qui affleure surtout dans la partie nord-est (en jaune et brun sur la figure III.9a),
- la série volcanique des trapps du Yémen, couvrant la majorité de la zone analysée, avec des termes acides en position haute dans la série (en bleu sur la figure III.9a),
- un remplissage volcano-sédimentaire quaternaire, disposé dans les fonds de vallée (cours d'eau en vert sur la composition colorée).

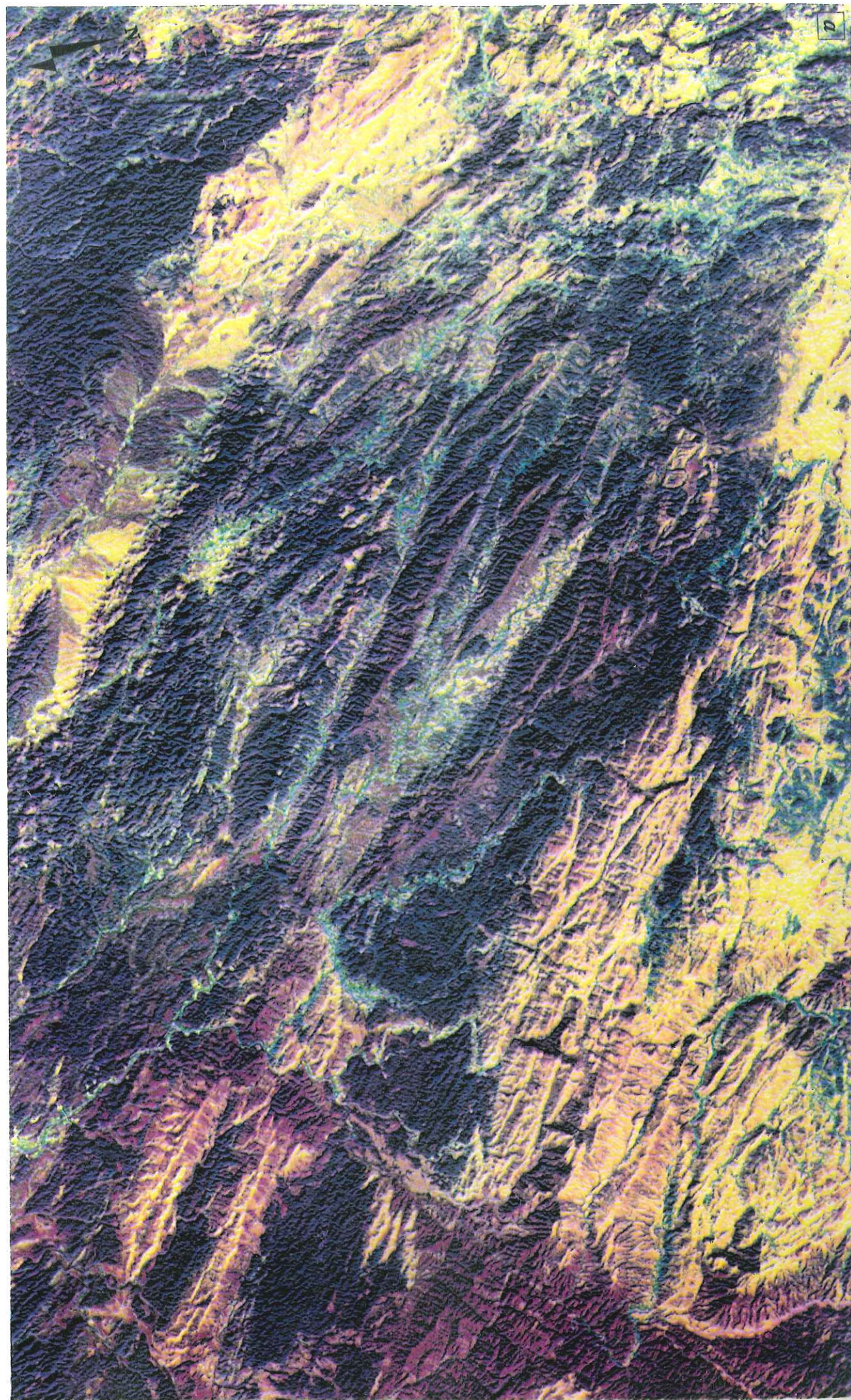
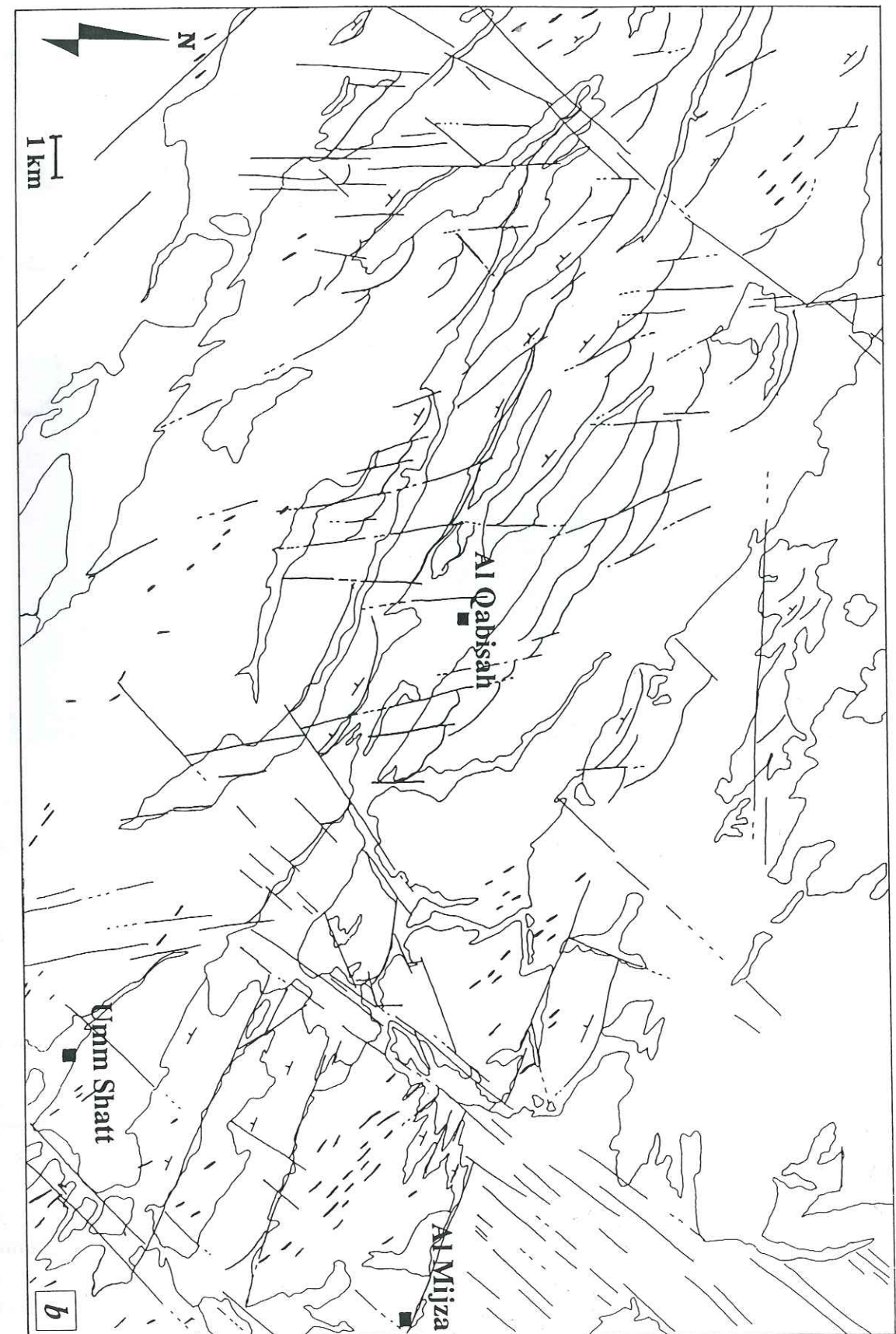


Figure III.9 a- Composition colorée réalisée à partir des canaux 1, 4 et 7 de la scène Landsat TM 166-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Umm Shatt. Les dykes sont représentés sur cette carte par des tirets épais.



Les séries sédimentaires et les trapps sont localement traversés par des dykes de matériel basique orientés N120 à N140 et verticaux pour la plupart. De par leur lithologie, ces dykes sont souvent moins érodés que les trapps acides qu'ils recoupent et sont facilement identifiables sur les images satellitaires (figure III.10).

Figure III.10 Morphologie d'un dyke intrusif dans des trapps au dos d'un bloc basculé.

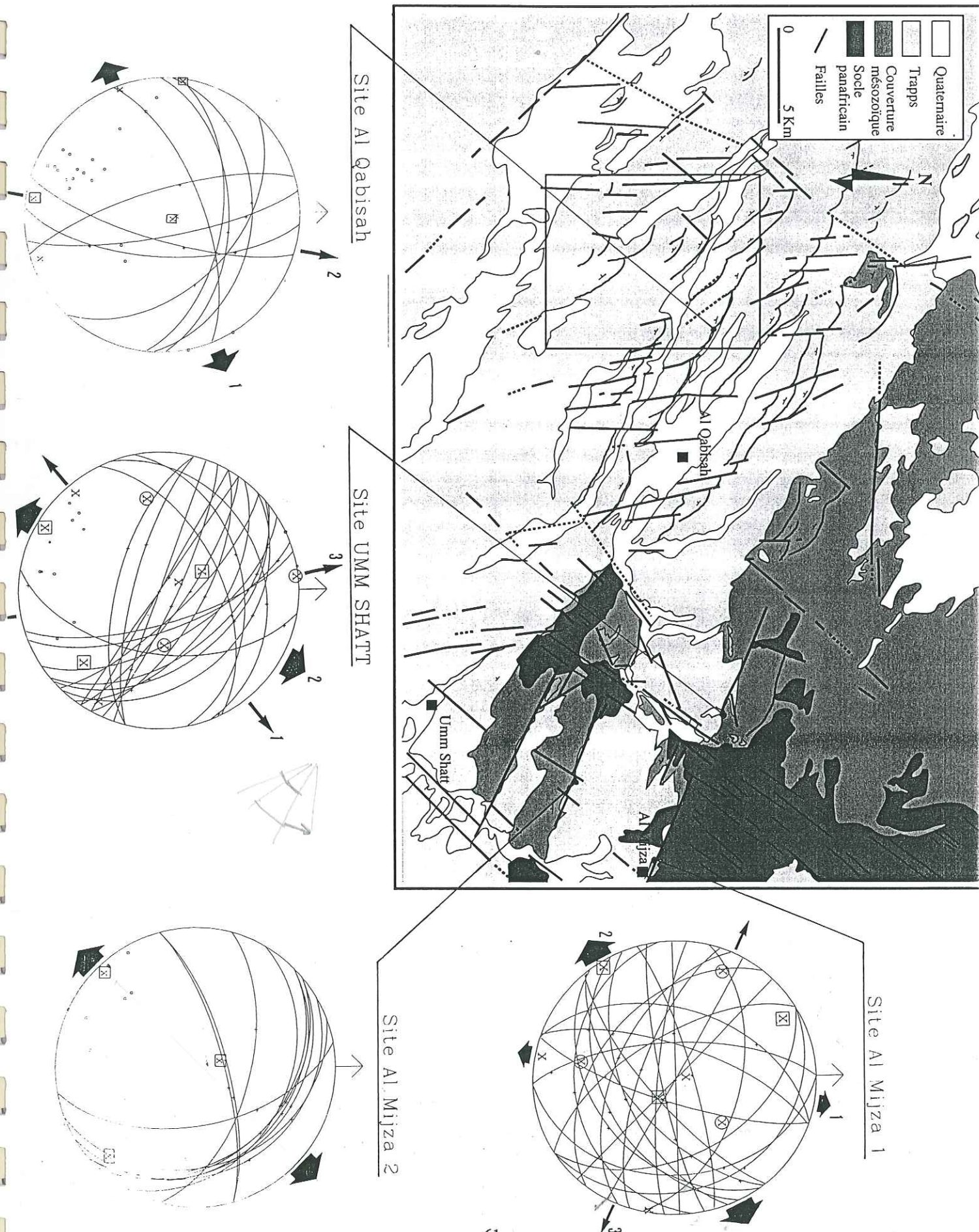


Le secteur de Umm Shatt est découpée par trois familles de failles, distinguées, sur les images ou sur le terrain, par leurs orientations :

- des failles normales d'orientation moyenne N120 qui affectent essentiellement les séries sédimentaires et les trapps,
- des décrochements le plus souvent dextres N160 qui affectent les mêmes terrains,
- des décrochements sénestres N40, à proximité des affleurements du socle panafricain et parallèles à la foliation qui s'y développe (figure III.9).

Les failles N120 et N160 définissent des systèmes de blocs basculés de 30° environ, en direction de la Mer Rouge, comme l'attestent les différents marqueurs géologiques et morphologiques identifiables sur les images Landsat TM et SPOT. Latéralement, ces blocs basculés sont limités par les décrochements N40, notamment à l'ouest des villages de Al Mijza et de Umm Shatt. L'analyse des mesures de terrain réalisées sur ces failles (programme STRESS), met en évidence une direction d'extension principale orientée N50 et qui se retrouve sur l'ensemble des sites (figure III.11). Pour certains sites, cette extension est associée à une phase décrochante N10 à N170 (sites Umm Shatt et Al Qabisah par exemple).

Figure III.11 Carte structurale interprétative du secteur de Umm Shatt. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues. Le cadre intérieur correspond à la portion de ce secteur qui sera étudiée dans le chapitre 5.



Cette phase s'exprime surtout dans les sites où des accidents N160 décrochants se développent en association avec les failles normales N120. La chronologie entre ces deux phases est difficile à établir de façon nette soit sur les images, soit sur le terrain, ce qui est en faveur d'un jeu synchrone de ces accidents. Cette extension est donc contemporaine de la formation des structures N120 et N160 limitant les blocs basculés ainsi que de la mise en place des dykes. Les sites mesurés à proximité des décrochements N40 montrent l'existence d'une phase décrochante N50, clairement antérieure aux deux précédentes, (site Umm Shatt de la figure III.11). L'existence de cette phase montre l'importance des structures héritées lors du développement de la fracturation. Il semble que ces accidents N40, sub-parallèles à la foliation présente dans le socle, fonctionnent en premier, peut-être par réactivation des zones de faiblesse mécanique.

Cinématique locale

A partir des données structurales obtenues, une interprétation de la déformation dans ce secteur peut être développée. Les décrochements N40 identifiés sur les images et mesurés sur le terrain définissent les limites de couloirs de déformation dans lesquels se développent des systèmes de blocs basculés séparés par des failles N120 et N160. L'analyse de secteurs situés dans le prolongement est ou ouest du secteur de Umm Shatt, à partir des images satellitaires (figures III.7 et III.8), confirme la validité de cette hypothèse. L'ensemble de ces déformations, postérieur à la mise en place des trapps se produit sous un régime extensif N50. Cette phase extensive est à rapprocher de celle décrite par Huchon et co-auteurs [1991], au Nord-Yémen dans les régions de Taizz et Manakhah et datée du Miocène moyen.

3.2.2 Secteur de Dhala

Le secteur de Dhala (figure III.12) présente les mêmes caractéristiques lithologiques que le secteur de Umm Shatt. Le socle panafricain affleure essentiellement dans la partie est (en violet et brun sombre sur la figure III.12a). Les séries sédimentaires du Jurassique et du Crétacé, constituent sa couverture (en brun-clair sur la figure III.12a) et sont surmontées en discordance par les trapps du Yémen. Ces trapps couvrent la majeure partie de la zone étudiée. La répartition des signatures spectrales de ces roches sur les images indique l'existence de deux ensembles différents au sein de ces trapps (figure III.12a), probablement à relier aux différenciations pétrographiques réalisées dans ce secteur entre trapps basiques (en bleu sur la composition colorée) à la base et trapps acides (en marron) au sommet de la série [Moseley, 1969; Chazot, 1993]. Sur les images, cette série des trapps montre fréquemment à son sommet, des structures circulaires correspondant probablement à des caldeiras. Les séries volcaniques sont entrecoupées de dykes d'orientation moyenne N120. Deux plutons granitiques traversent ces séries, l'un au sud du secteur, et l'autre au nord-ouest de Dhala, daté de 22 Ma [Zumbo et al, soumis].

Ce secteur couvre une partie du fossé majeur situé au nord-ouest d'Aden (figure III.8). Ce fossé est limité à l'est par des failles, orientées N140 et qui mettent en contact anormal le socle et les séries sus-jacentes par l'intermédiaire d'un escarpement important (parfois plus de 1000 mètres). A l'intérieur de ce fossé, se développent des systèmes de blocs basculés limités par des failles normales N110 à N120 et des décrochements associés N140 à N160. Le pendage de ces blocs est généralement vers le Sud-Ouest (vers l'intérieur du fossé) mais localement, se développent de petits systèmes de horsts et grabens (Sud-Est de Dhala).

A l'est de Dhala et au nord de Al Habilayn, ces blocs basculés sont limités par des décrochements N70 généralement sénestres, parallèles à la foliation générale sub-verticale ou aux shear zones développées dans le socle (Nord-Ouest d'Habil Jabr). Localement, cette foliation est orientée N130 à N150, à proximité des failles bordières du fossé. Enfin, on peut mettre en évidence sur les images, principalement dans la partie est, des accidents décrochants de grande longueur et rectilignes, orientés N90 à N100. Ces accidents sont recoupés par les autres failles et notamment les failles N140 limitant le fossé. Ils sont donc antérieurs aux autres structures.

Compte-tenu du peu de failles visibles sur les images et mesurables sur le terrain (altération importante des roches volcaniques), aucun site n'a pu être analysé dans la zone des trapps acides. Cette partie sommitale de la série des trapps du Yémen est cependant clairement affectée par les failles normales N110, et il semble donc que l'extension soit postérieure à la mise en place des termes acides des trapps. Sur l'ensemble des sites analysés dans ce secteur, on peut caractériser une extension orientée N45 (figure III.13), en association avec le développement de dykes N120. Cette extension est associée sur certains sites à une phase N80 en régime décrochant. La chronologie relative entre ces deux phases reste cependant difficile à préciser. Le site d'Habil Jabr, situé à proximité du grand décrochement N100, montre une phase N90 qui n'a qu'une valeur locale. Cette phase est toutefois antérieure à la phase N45, confirmant le jeu précoce de cet accident.

Figure III.12 a- Composition colorée réalisée à partir du traitement des canaux 3, 4 et 7 des quarts Nord-Est et Sud-Est de la scène Landsat TM 165-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Dhala.

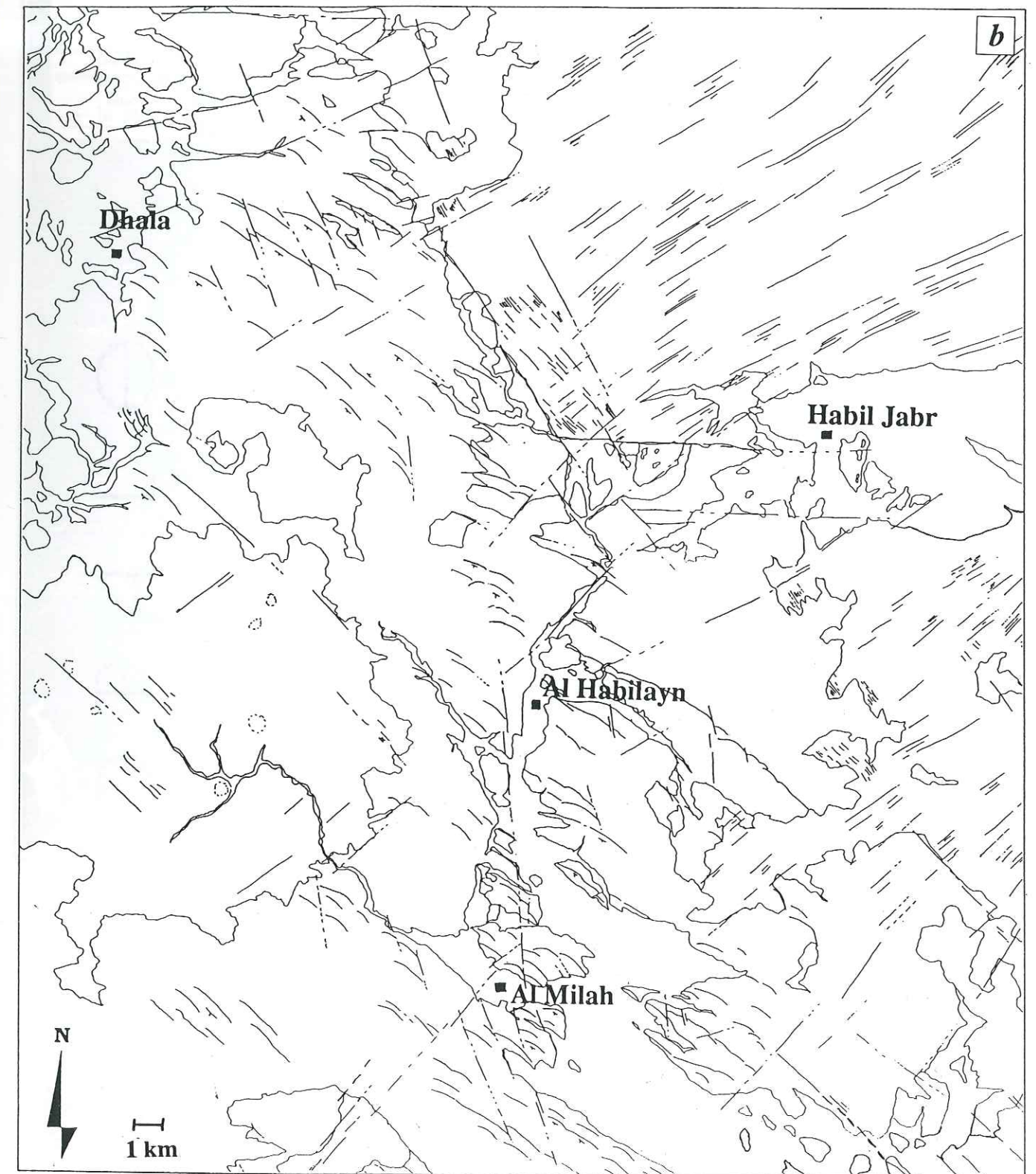
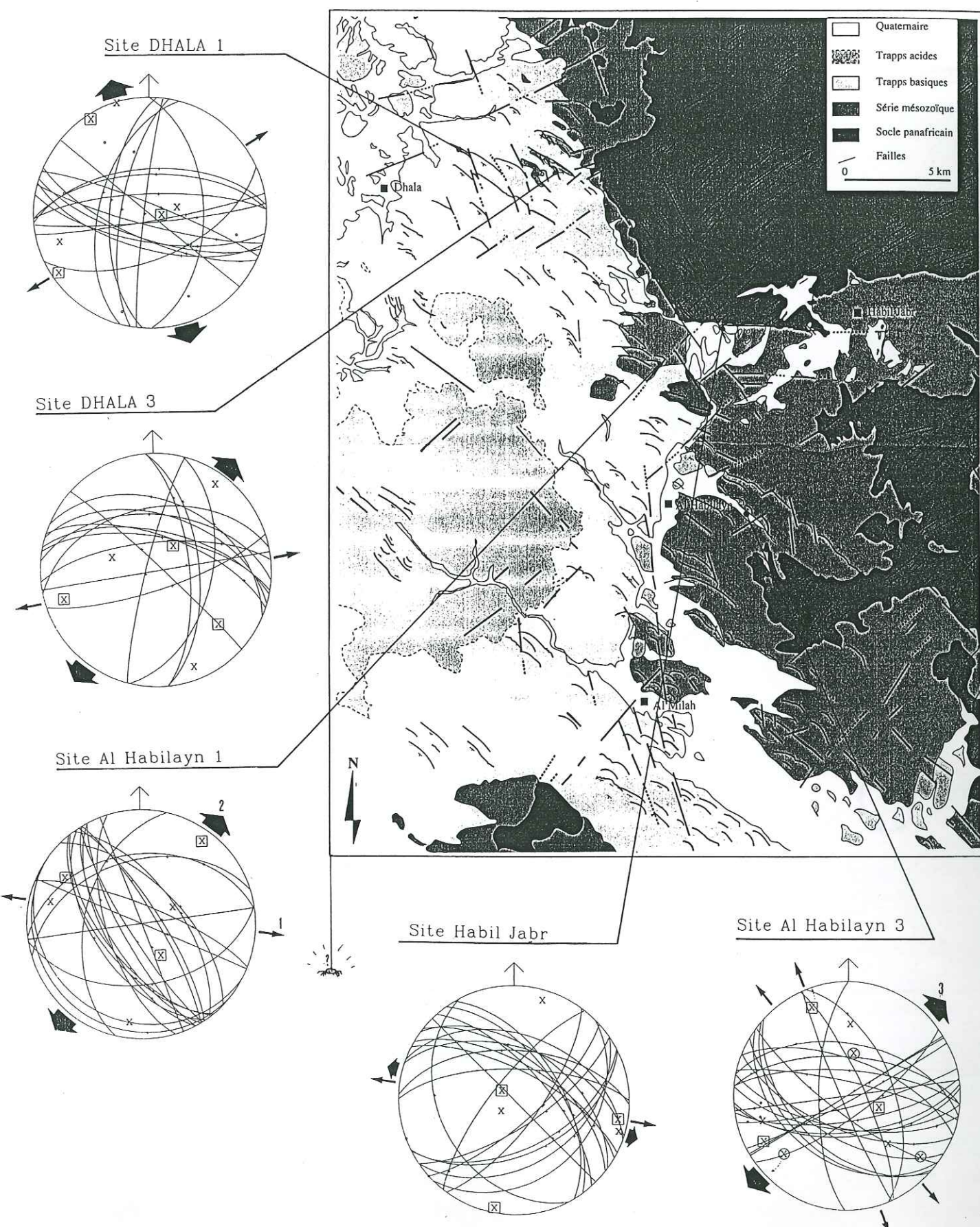


Figure III.13 Carte structurale interprétative du secteur de Dhala. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues.



Cinématique locale

Les sites analysés ne permettent pas de définir la phase responsable de la formation des failles N140 qui limitent le fossé. La présence des séries du Crétacé discordantes sur le socle (à l'est de Dhala notamment) et l'absence de trapps à l'est de ce fossé, confirmée par les études sismiques en mer [Tard et al, 1991] sont des arguments en faveur d'un jeu plus précoce des failles bordières du fossé. L'étude réalisée ici ne permet toutefois pas de trancher.

D'un point de vue chronologique, les déformations en régime extensif N45 sont probablement datées du Miocène moyen [Huchon et al, 1991; Tard et al, 1991]. Elles sont responsables de la formation des systèmes de blocs basculés séparés par des failles N110 et N140 à N160, après la mise en place des trapps. Dans ce secteur, des décrochements N70 permettent le découpage latéral des systèmes de blocs basculés. Ces accidents compte-tenu de leur orientation, sont probablement hérités des structures panafricaines du socle.

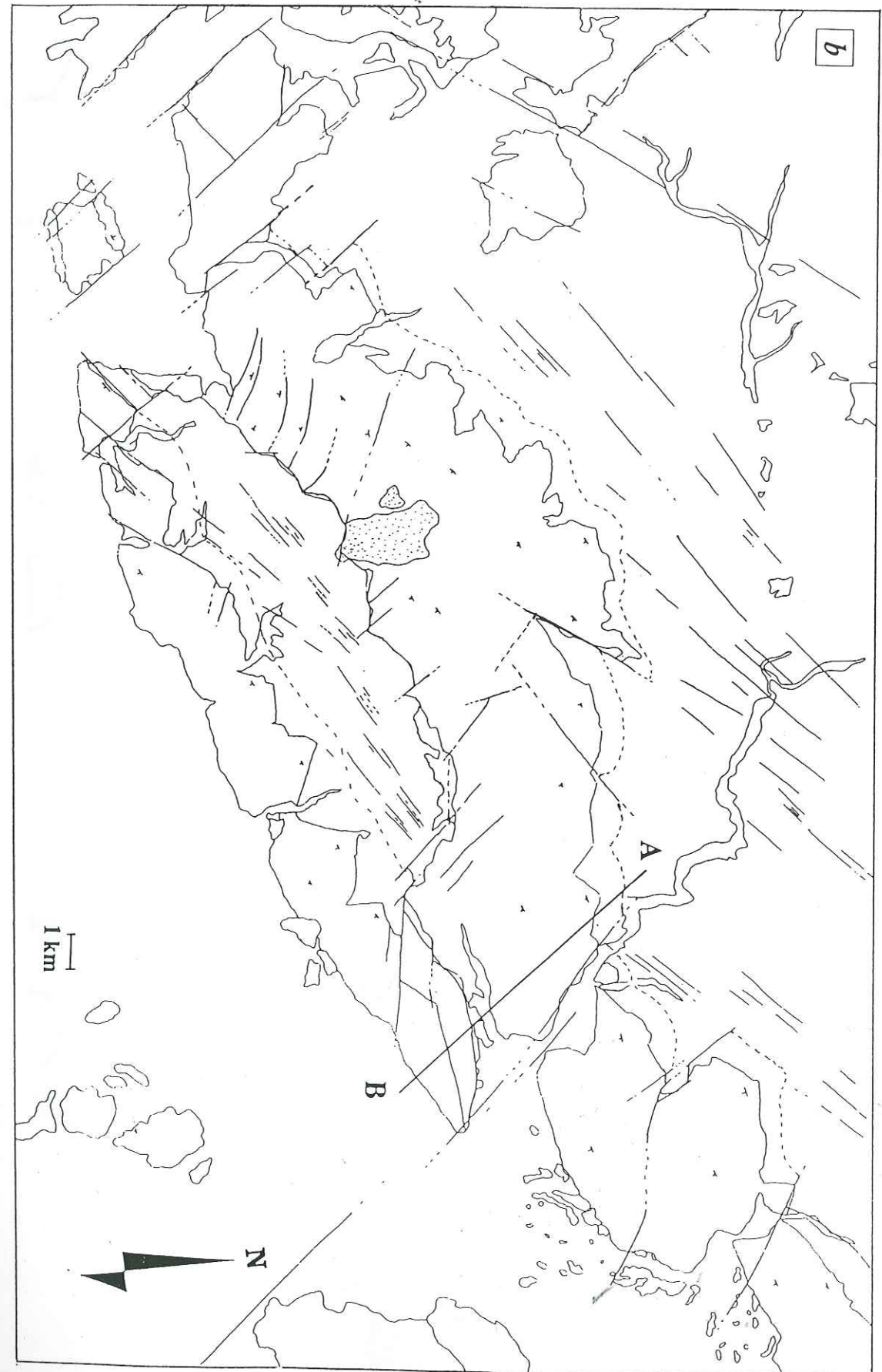
3.2.3 Secteur de Ba'tays

Ce secteur se situe à l'est des deux précédents (figure III.8) et notamment à l'est du fossé décrit sur le secteur de Dhala. Il couvre un des bassins mésozoïques développés sur la marge sud du Yémen. Le caractère lithologique majeur qui différencie ce secteur des autres est l'absence de trapps (figure III.14). Le socle panafricain affleure au nord de la zone (teintes sombres sur la figure III.14a). Il est recouvert en discordance par une série sédimentaire puissante de plusieurs centaines de mètres, du Jurassique inférieur au Crétacé. Sur la composition colorée (figure III.14a), on distingue nettement deux ensembles différents par leur signature spectrale qui correspondent au Jurassique inférieur et moyen (en marron), et au Jurassique supérieur (en beige clair). La partie sud de la zone étudiée est ennoyée sous les sables quaternaires et récents de la plaine côtière (en violet sur la figure III.14a), qui s'étend en bordure du Golfe d'Aden sur plusieurs milliers de kilomètres.

Le socle présente une foliation bien marquée, orientée N70 environ et sub-verticale, ainsi que des shear zones et des plis isoclinaux bien visibles sur les images satellitaires (figure III.14). Des décrochements dextres N120 à N140 affectent les séries sédimentaires, notamment au nord de Ba'tays et à l'extrémité ouest du secteur. Localement, ces décrochements n'affectent que les séries du Jurassique supérieur. Ceci est bien visible sur les vues perspectives construites à partir des MNT et des images SPOT panchromatiques focalisées sur ce secteur (figure III.16a). D'autres décrochements orientés N70, dont le sens varie d'un secteur à l'autre, mettent en contact socle et série sédimentaire.



Figure III.14 a- Composition colorée réalisée à partir du traitement des canaux 3, 4 et 7 du quart Sud-Est de la scène Landsat TM 165-51; b- Carte structurale interprétative du secteur de Ba'tays. Le trait qui rejoint les points A et B correspond à la coupe illustrée sur la figure III.15. La zone figurée en pointillés correspond à un slump dans les séries jurassiques.



Cependant, l'épaisse série sédimentaire montre un pendage assez fort (35° en moyenne), en direction du Sud-Est (Golfe d'Aden), comme l'indiquent les données de terrain et les divers marqueurs géomorphologiques visibles sur les images (figure III.16b). De plus, ces séries sédimentaires sont dédoublées, dans la partie centrale du secteur de Ba'tays (figure III.14). L'interprétation du pendage de ces séries et de leur dédoublement, associé à l'analyse de vues perspectives, conduit à proposer un système de blocs basculés limité par des failles N70. Cette interprétation est visualisée sur la coupe AB de la figure III.15. La trace cartographique des failles limitant les blocs est matérialisée sur la figure III.14b par des traits pointillés, dans les zones où leur position exacte est difficile à mettre en évidence sur l'image couvrant le secteur. Localement, ces failles normales N70 apparaissent très nettement et mettent en contact socle et série sédimentaire (brèche de faille).

Figure III.15 a- Coupe interprétative de la déformation en blocs basculés du secteur de Ba'tays. L'exagération verticale est de 2. La coupe est localisée sur la figure III.14b. Le cadre tracé sur la coupe situe la figure III.17; b- Vue perspective du Sud-Est du secteur de Ba'tays. La ligne blanche correspond à la coupe interprétative (a).

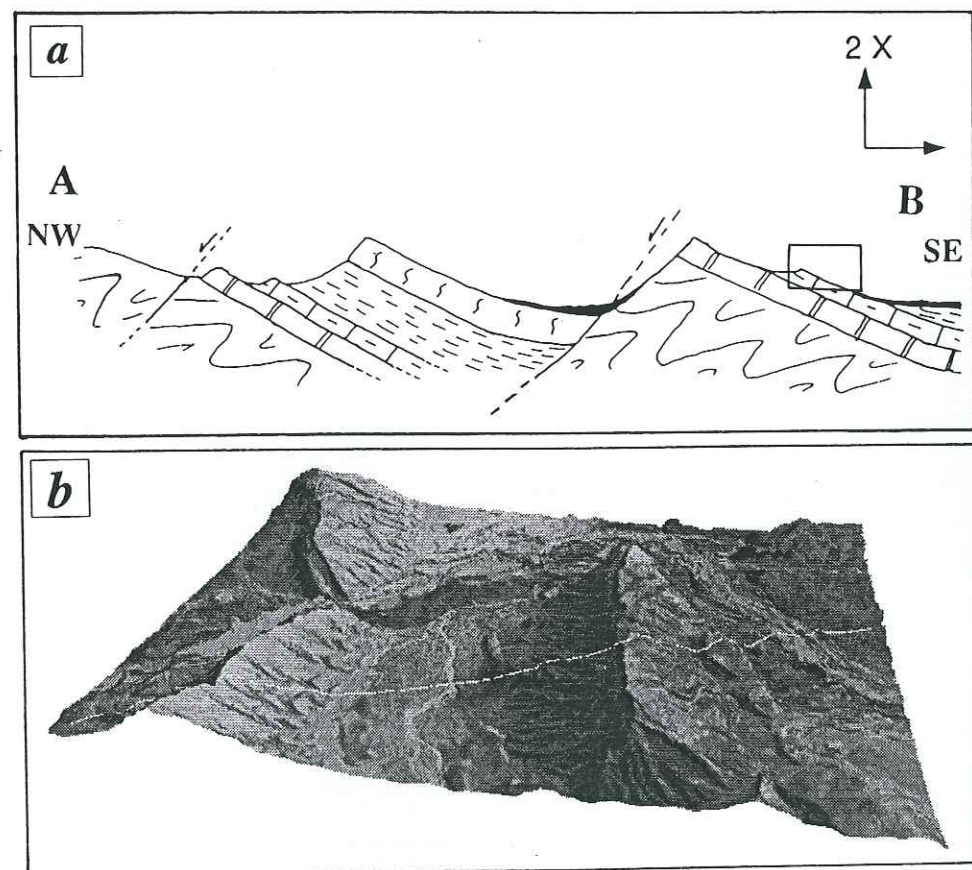


Figure III.16 a- Vue perspective des séries jurassiques de la partie ouest du secteur de Ba'tays. Elle illustre les failles normales N140 (flèches) qui affectent seulement la partie supérieure des séries jurassiques; b- Vue perspective de l'Est du secteur de Ba'tays, depuis le Nord-Est. Les séries du Jurassique supérieur apparaissent en teintes claires, celles du Jurassique inférieur en gris clair, et le socle en gris sombre ou noir.

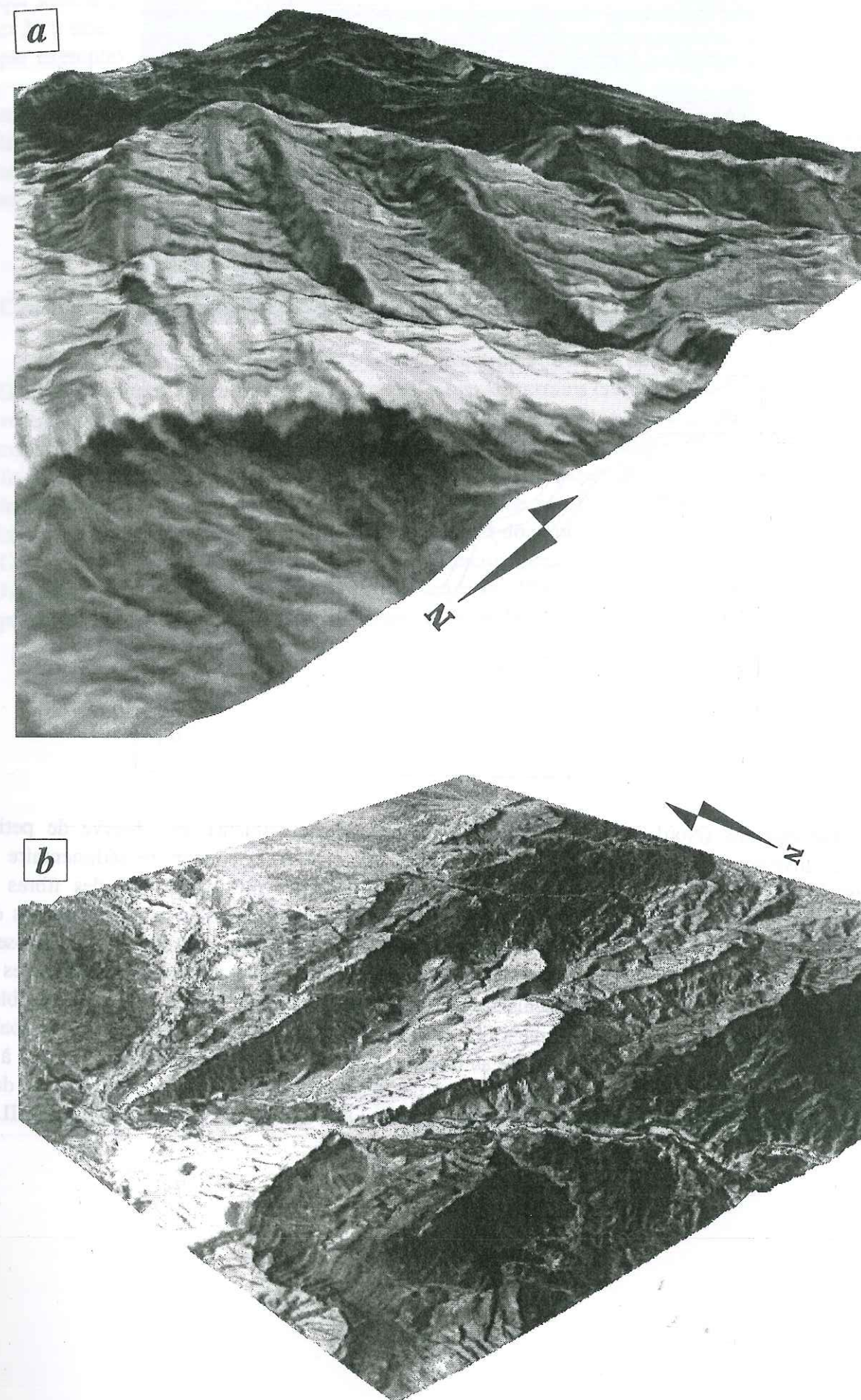
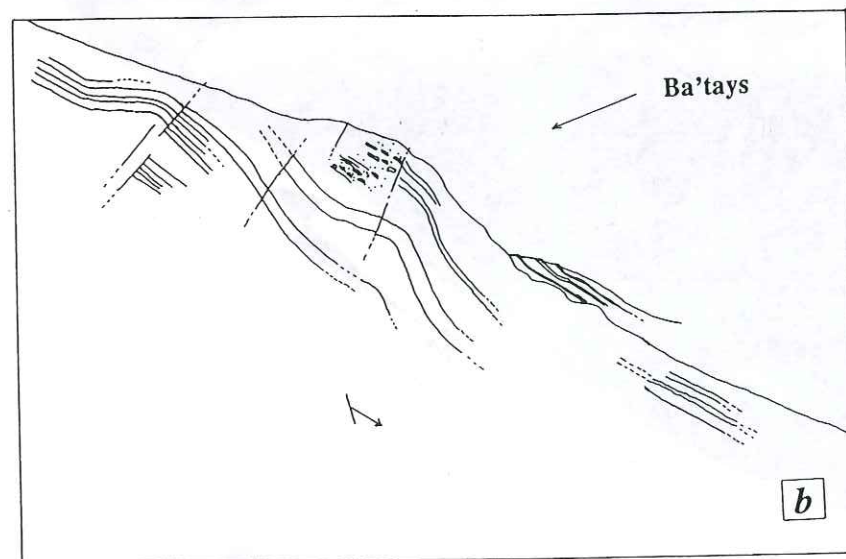


Figure III.17 Plis d'entraînement dans la couverture sédimentaire du Jurassique supérieur, au Nord-Est de Ba'tays (voir figure III.15 pour la localisation). a- Photographie; b- Interprétation.



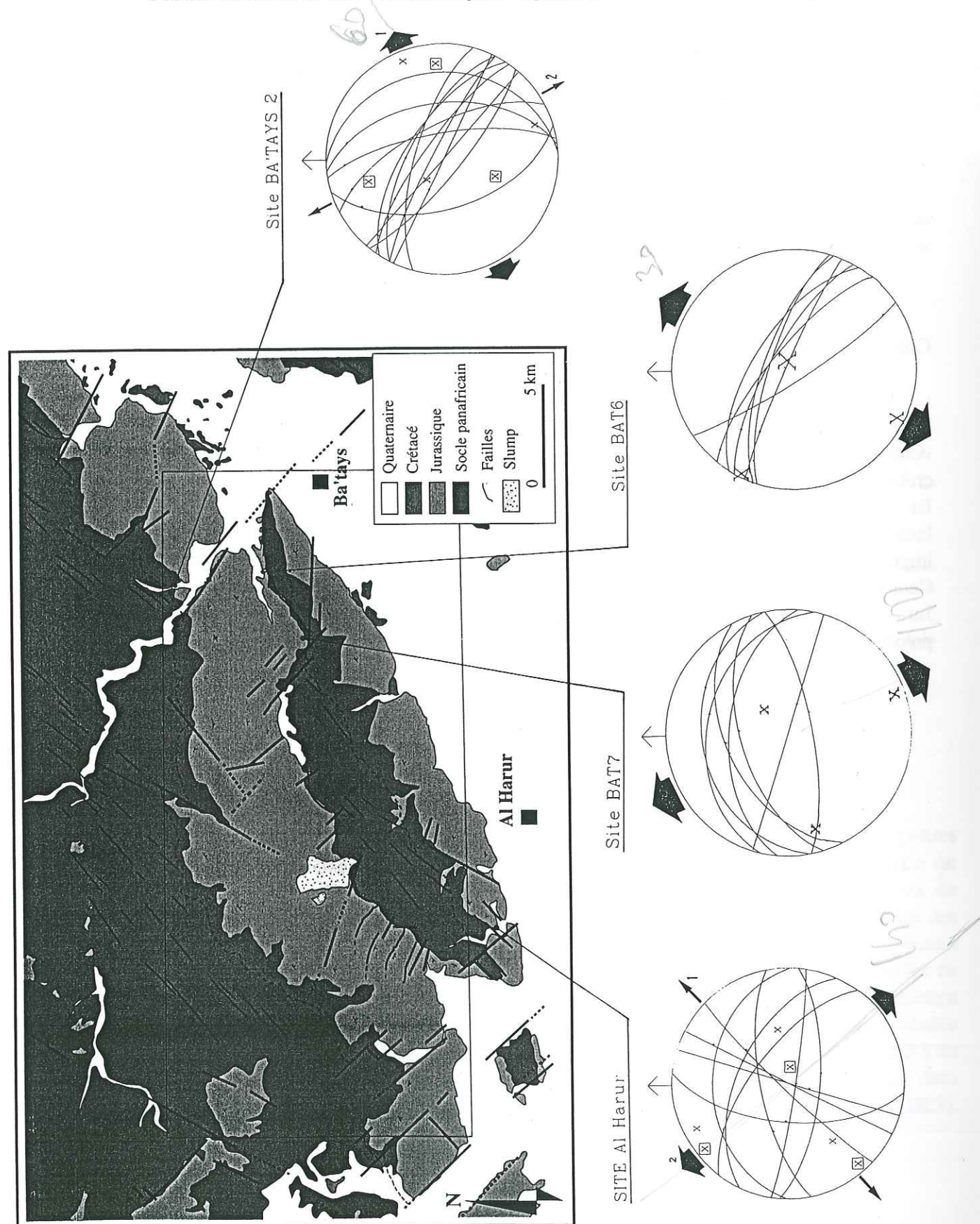
Par endroits (Nord-Ouest de Ba'tays et d'Al Harur notamment), on observe de petites failles inverses orientées N70, mettant en contact le socle et la couverture sédimentaire du bloc basculé situé devant. A proximité de ces failles, des plis métriques, des fibres de gypse longues de plusieurs décimètres, ou une diminution importante des pendages du dos des blocs suggèrent l'existence d'un décollement de la série sédimentaire sur des niveaux gypseux inférieurs (figure III.17). Dans le secteur au Nord-Ouest de Al Harur, des failles normales en ciseaux, orientées N120, affectent seulement les séries du Tithonique (figure III.16a) et semblent confirmer l'hypothèse d'un décollement de cette partie de la série sédimentaire. Il est probable que ce décollement est un phénomène lié au basculement important des séries. Il correspond à du glissement gravitaire postérieur au basculement des séries, à la faveur de niveaux gypseux dans la formation de Mabdi notamment [Greenwood et Beackley, 1967; Tard et al, 1991] (figure III.5).

Les résultats de l'analyse structurale sont présentés sur la figure III.18. Il est difficile d'identifier une seule phase majeure reconnue sur l'ensemble des sites. On distingue une phase extensive pure d'orientation moyenne N45, bien représentée dans la partie est du secteur (sites Ba'tays2 et BAT6). Les sites Al Harur et BAT7 montrent une phase extensive orientée N135, qui semble postérieure à la phase précédente. Près de Al Harur, les accidents décrochants N140 et N70 entraînent probablement des variations locales de la direction d'extension (site Al Harur par exemple). Le jeu de ces décrochements N140, qui recoupent les blocs basculés, est alors postérieur à la mise en place des failles N70 séparant ces blocs. Un des sites mesurés montre même un régime de déformation en compression. Compte-tenu de la localisation de ce site dans le haut de la série sédimentaire (Tithonique), au Nord-Ouest de Al Harur, ce résultat est en accord avec les observations de terrains concernant le glissement gravitaire d'une partie de la série Jurassique sur les niveaux gypseux.

Cinématique locale

La datation des déformations de ce secteur, par rapport à celles des secteurs de Umm Shatt et Dhala, est difficile à établir. Les structures affectent les terrains crétacés mais l'absence de trapps volcaniques oligo-miocènes empêchent une datation relative plus précise. De plus, les terrains crétacés correspondent à des faciès grossiers discordants sur les séries calcaires du Jurassique. Ils montrent des pendages plus faibles que les séries jurassiques mais leurs affleurements sont localisés principalement au bas des blocs, dans la zone où il existe des variations de pendage importantes. L'extension mesurée dans ce secteur est donc probablement postérieure au Crétacé. Ceci n'empêche pas l'existence d'évènements tectoniques antérieurs, décrits par exemple au Jurassique [Greenwood et Beackley, 1967; Tard et al; 1991], pouvant entraîner un basculement précoce des séries jurassiques et expliquant la discordance des terrains crétacés.

Figure III.18 Carte structurale interprétative du secteur de Ba'tays. Cette carte est construite à partir des cartes structurales et géologiques précédentes. Les sites microstructuraux les plus représentatifs sont reportés, ainsi que les directions d'extension obtenues. Le cadre intérieur correspond à la portion de ce secteur étudiée dans le chapitre 5.



III.3.3 Caractères comparés des trois secteurs

La comparaison de la déformation extensive dans ces trois secteurs de la marge sud du Yémen fait ressortir les caractères généraux communs suivant :

1. Les blocs de chaque zone déformée sont basculés en direction de l'océan ou du centre du fossé (dans le cas du secteur de Dhala).
2. On observe le développement de failles récentes, dans la couverture volcano-sédimentaire du socle panafricain, dont la direction reprend des directions structurales qui existaient déjà dans ce socle. Ces structures héritées limitent des zones à déformation extensive, surtout dans les secteurs de Umm Shatt et Dhala. Elles définissent ainsi les bordures de chaque système de blocs basculés.
3. Les images et les données de terrain montrent l'association de failles normales et décrochements indiquant la structuration de ces trois secteurs sous un régime extensif, oblique par rapport aux bordures de chaque système de blocs basculés. Certains blocs basculés présentent des rotations autour d'axes verticaux (failles en ciseaux).
4. Pour chaque système de blocs basculés définis, il existe le plus souvent une déformation interne des blocs. Elle s'exprime soit par la présence de dykes (Umm Shatt, Dhala), soit par la présence de glissement gravitaire entraînant des variations de pentages des séries sédimentaires et la formation de failles secondaires au dos des blocs (Ba'tays).

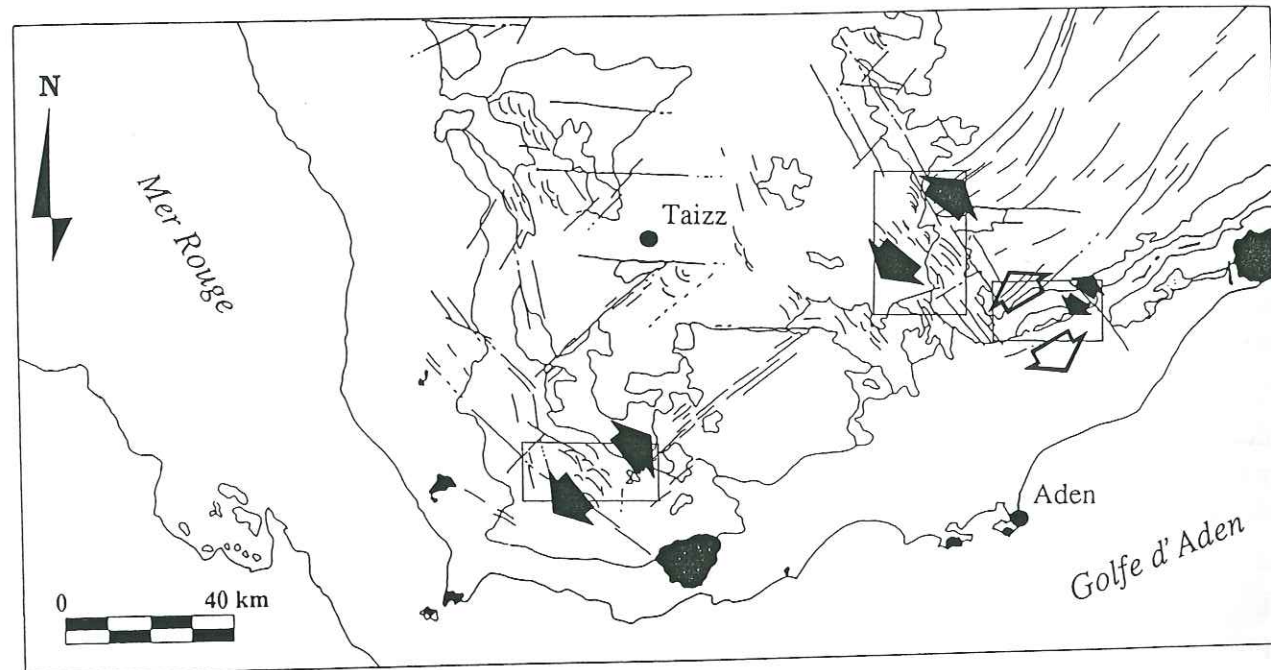
Enfin, la description des systèmes de blocs basculés, à la fois sur le terrain et par imagerie satellitaire, montre l'importance de l'orientation des structures pré-existantes par rapport à la direction de l'extension. Dans les secteurs de Umm Shatt ou Dhala, l'extension majeure d'orientation moyenne N50 est sub-parallèle aux structures anciennes. Dans ce cas, ces structures définissent des limites mécaniques décrochantes (failles de transfert). Dans le secteur de Ba'tays, pour l'extension moyenne N135, l'écart angulaire avec la direction des structures anciennes du socle est de 65°. Dans ce cas, les zones de faiblesse mécanique constituées par les structures héritées sont probablement réutilisées pour la structuration en failles normales.

Les trois secteurs étudiés présentent également une différence importante quant à la géométrie des blocs basculés. La largeur de ces blocs varie fortement entre les secteurs de Umm Shatt et Dhala et le secteur de Ba'tays. Dans le secteur de Umm Shatt par exemple, les blocs basculés sont larges de 1 à 2 km et longs de 5 km au maximum. Dans le secteur de Ba'tays, les blocs sont plus larges (5 km en moyenne) et s'étendent sur plusieurs dizaines de kilomètres de long. Ceci a des conséquences sur la profondeur des interfaces mécaniques sur lesquelles s'enracinent les failles limitant les blocs basculés. Cependant, l'absence de données ne permet pas d'aborder cet aspect de la géométrie de la zone déformée.

III.3.4 Implications régionales

L'analyse combinée d'images satellitaires et de données de terrain a permis de préciser la cinématique de l'extension sur la marge sud du Yémen. En remplaçant les résultats des analyses dans trois secteurs différents sur la carte structurale du Yémen, on peut en extraire quelques conclusions sur la déformation continentale associée au rifting océanique Mer Rouge – Golfe d'Aden (figure III.19).

Figure III.19 Carte interprétative de la marge sud-yéménite. Les flèches représentent les directions d'extension obtenues à partir de l'étude structurale.



Le fossé N140 passant par Dhala, décrit comme une zone de transfert par Tard et co-auteurs [1991], constitue une zone séparant deux ensembles à évolution contrastée. L'analyse des données de terrain et des images satellitaires renforce cette interprétation. En effet, à l'ouest de ce fossé, se développe une extension N50 décrite au sud (Umm Shatt, Taizz) comme au nord du Yémen [Huchon et al, 1991]. Cette extension datée du Miocène moyen est responsable de la structuration en blocs basculés des séries mésozoïques et des trapps, d'orientation principalement "Mer Rouge". C'est également dans ce secteur que se mettent en place la plupart des plutons tertiaires décrits au Yémen [Capaldi et al, 1987; Mohr, 1991].

A l'Est, au-delà du fossé de Dhala, la géométrie des structures change. L'extension majeure, orientée N135 dans le secteur de Ba'tays, semble post-Crétacé. Une phase extensive antérieure, orientée N45 est décrite. Cependant, la chronologie entre ces phases et l'extension N50 généralisée à l'ensemble du Yémen, au Miocène moyen [Huchon et al, 1991], n'est pas clairement établie. Il semble donc difficile de rapprocher la phase extensive N45 dans le secteur de Ba'tays de l'extension N50 décrite au Miocène moyen.

Ces caractéristiques géométriques constituent autant de données et de contraintes qui seront utilisées pour valider la quantification de l'extension et l'analyse cinématique de la déformation de la marge sud du Yémen.

IV

GEOMETRIE DE LA FRACTURATION DU GREGORY RIFT

IV Géométrie de la fracturation du Gregory Rift (Kenya)

Cette analyse a pour but de préciser et de quantifier :

- l'évolution des paramètres décrivant les structures fragiles (orientation, longueur, espacement, quantité d'extension associé), présentes sur un segment de rift continental,
- la répartition spatiale des structures dans ce même segment de rift.

L'approche utilisée consiste en une analyse en deux dimensions du secteur choisi dans le Gregory Rift, à partir d'images des satellites Landsat 2 et SPOT. Dans un premier temps, des interprétations géologiques de ce segment du rift sont réalisées à partir des images préalablement traitées. Sur ces interprétations, les paramètres géométriques des structures mises en évidence sont mesurés. L'utilisation de couples stéréoscopiques d'images SPOT analysés de façon optique permet de préciser qualitativement certains paramètres tels que le pendage des blocs basculés ou le rejet des failles. Chaque mesure est ensuite analysée par des outils statistiques classiques (densité de répartition, orientations ...) ou à l'aide d'outils mathématiques différents (analyse de la dimension fractale notamment).

IV.1 Interprétations structurales

IV.1.1 Localisation du secteur d'étude

La zone qui fait l'objet de cette étude est située sur le Gregory Rift, entre le lac Baringo au nord et le lac Magadi au sud (figure III.3). Elle couvre les bassins de Baringo-Bogoria, de Nakuru-Naivasha, et une partie du bassin Magadi-Natron, ainsi que les zones d'accommodation qui séparent ces bassins. La zone située entre les lacs Bogoria et Nakuru, fait l'objet d'une étude de détail, principalement à proximité du bord est du rift.

Le choix de ce secteur est motivé par le fait que se trouvent juxtaposées au niveau de cette portion du Gregory Rift des zones à caractères structuraux différents mais facilement identifiables [Bosworth, 1987; Henry et al, 1990] :

- du lac Baringo au lac Bogoria, le rift présente des caractères assez "classiques" (blocs basculés, failles normales ...), ainsi que dans une zone située au sud du lac Nakuru. La direction moyenne des failles est N10 dans le bassin de Baringo-Bogoria, alors qu'elle est N140 dans le bassin de Nakuru-Naivasha.
- entre les lacs Bogoria et Nakuru, la zone d'accommodation décrite par Bosworth [1987] présente des structures obliques sur la direction moyenne du rift, N60 ou N140 respectivement reliées au Kavirondo Rift [McCall, 1967; Baker et al, 1972], ou au linéament d'Assoua [Vidal, 1985; Bosworth et al, 1986] associées aux failles normales néoformées.

Cette zone présente l'activité tectonique et sismique la plus récente de l'ensemble du Gregory Rift. Ceci a des implications évidentes sur l'expression morphologique des structures qui s'y développent et sur la connaissance de la structure profonde de ce secteur. Les données disponibles sont abondantes et peu controversées. La profondeur du "basement" (la base du remplissage volcano-sédimentaire) est bien connue [KRISP, 1987; Henry et al, 1990]. L'épaisseur minimale semble située dans la zone autour du lac Bogoria (environ 2 km), de même que la plus récente activité sismique. Les structures ne sont donc pas trop oblitérées par le remplissage et limitent des systèmes de blocs basculés bien développés [McCall, 1967; Griffiths, 1980; Vidal, 1985]. De plus, le climat et l'absence de végétation abondante permet une érosion différentielle des roches, moindre pour les séries volcaniques que pour les autres, ce qui ajoute à la bonne expression morphologique des laves exposées dans le rift. Enfin, la profondeur de l'interface fragile-ductile déduite de la profondeur des séismes récents est estimée dans le secteur, à environ 12 km.

Les images utilisées pour l'analyse de la fracturation de ce secteur sont issues des satellites Landsat 2 et SPOT. Pour le satellite Landsat, elles correspondent à deux scènes identifiées 181-60 et 181-61, de 185 km de côté et disponibles seulement sous la forme de tirages photographiques à l'échelle du 1/500 000ème. Ces images couvrent une zone qui s'étend du lac Baringo au nord jusqu'au lac Magadi au sud (figure III.3).

Les images numériques multibandes SPOT (XS) correspondent à un couple stéréoscopique (scène référencée 137-350 dans la GRS) focalisé entre les lacs Bogoria et Nakuru (figure III.3). Ces images numériques ont ainsi pu être traitées avant leur interprétation. Les restitutions sont réalisées à l'échelle du 1/100 000ème. Pour certains secteurs, des fenêtres de détails ont été extraites et restituées au 1/50 000ème.

IV.1.2 Interprétation des images Landsat

L'interprétation de la mosaïque réalisée par juxtaposition des deux scènes utilisées a pour objectif de produire une carte structurale simplifiée où ne sont représentées que les failles (directions), et les blocs basculés (directions et pendages), sans contours géologiques ni indications pétrographiques sur la nature des roches.

La figure IV.1 visualise l'interprétation réalisée à partir des images Landsat 2. On distingue des failles orientées N0 à N10, réparties sur l'ensemble du secteur étudié. Localement, apparaissent des failles N60 et N140. Ces dernières constituent les failles bordières du rift, dans le bassin de Nakuru-Naivasha.

IV.1.3 Interprétation des images SPOT

L'interprétation structurale est réalisée sur la scène du couple correspondant à la vue verticale du secteur. L'utilisation de la stéréoscopie permet d'affiner l'interprétation (pendages des blocs basculés notamment). Sur cette interprétation, seules les failles et quelques orientations de blocs basculés sont reportées, sans aucune indication lithologique. Les failles les plus représentées dans ce secteur (figure IV.2) sont les failles N0 à N10. Elles présentent, en carte, une courbure parfois assez prononcée et délimitent des systèmes de horsts et grabens (zone ouest de l'interprétation). Dans la partie est, apparaît une faille majeure N140, orientée localement N60.

Figure IV.1 a- Interprétation structurale des images Landsat 2. Seules les failles identifiées sur les images sont reportées; b- Schéma de disposition des bassins et des zones d'accommodation dans le secteur étudié [d'après Bosworth, 1987 et Verney-Green et al, 1991].

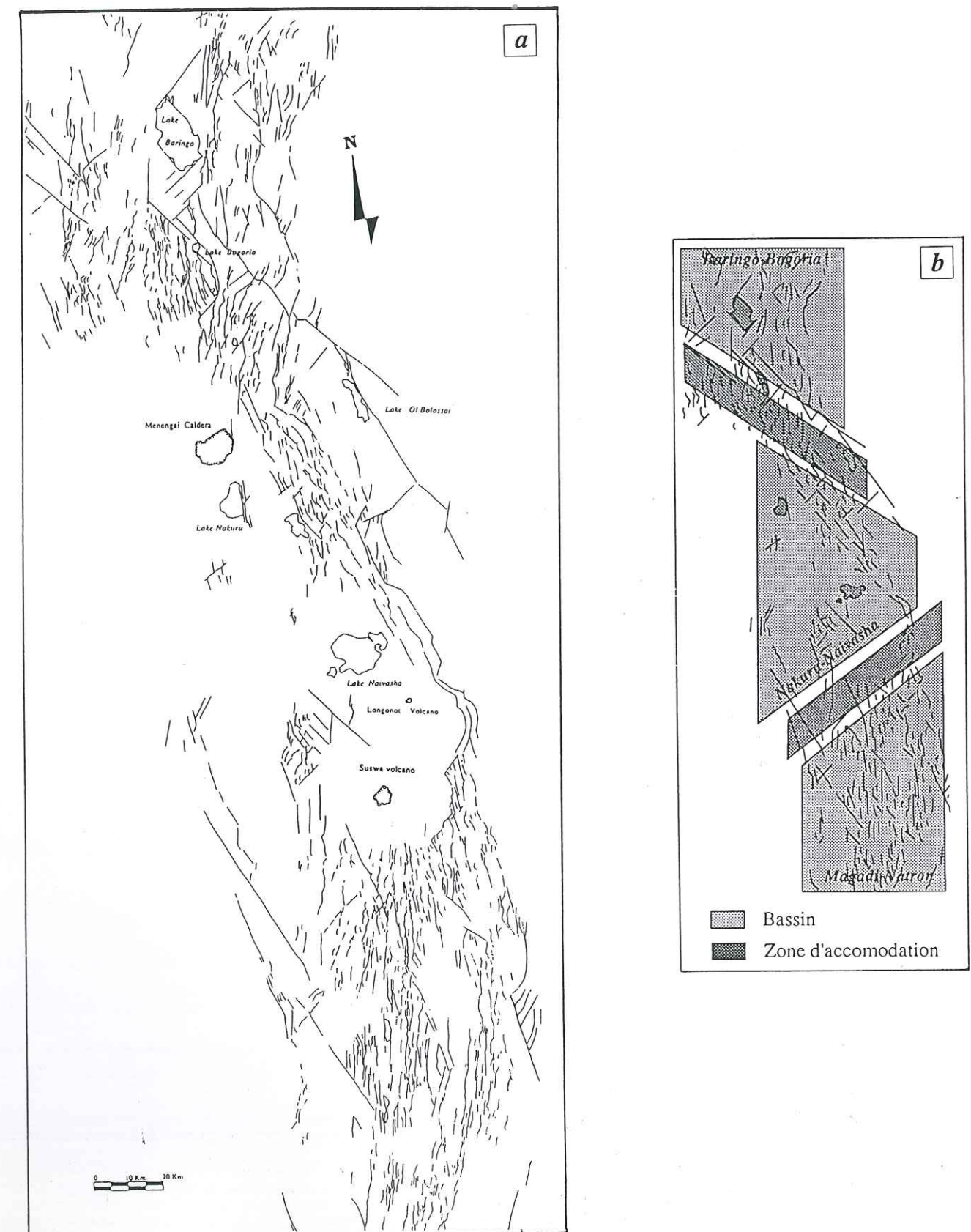
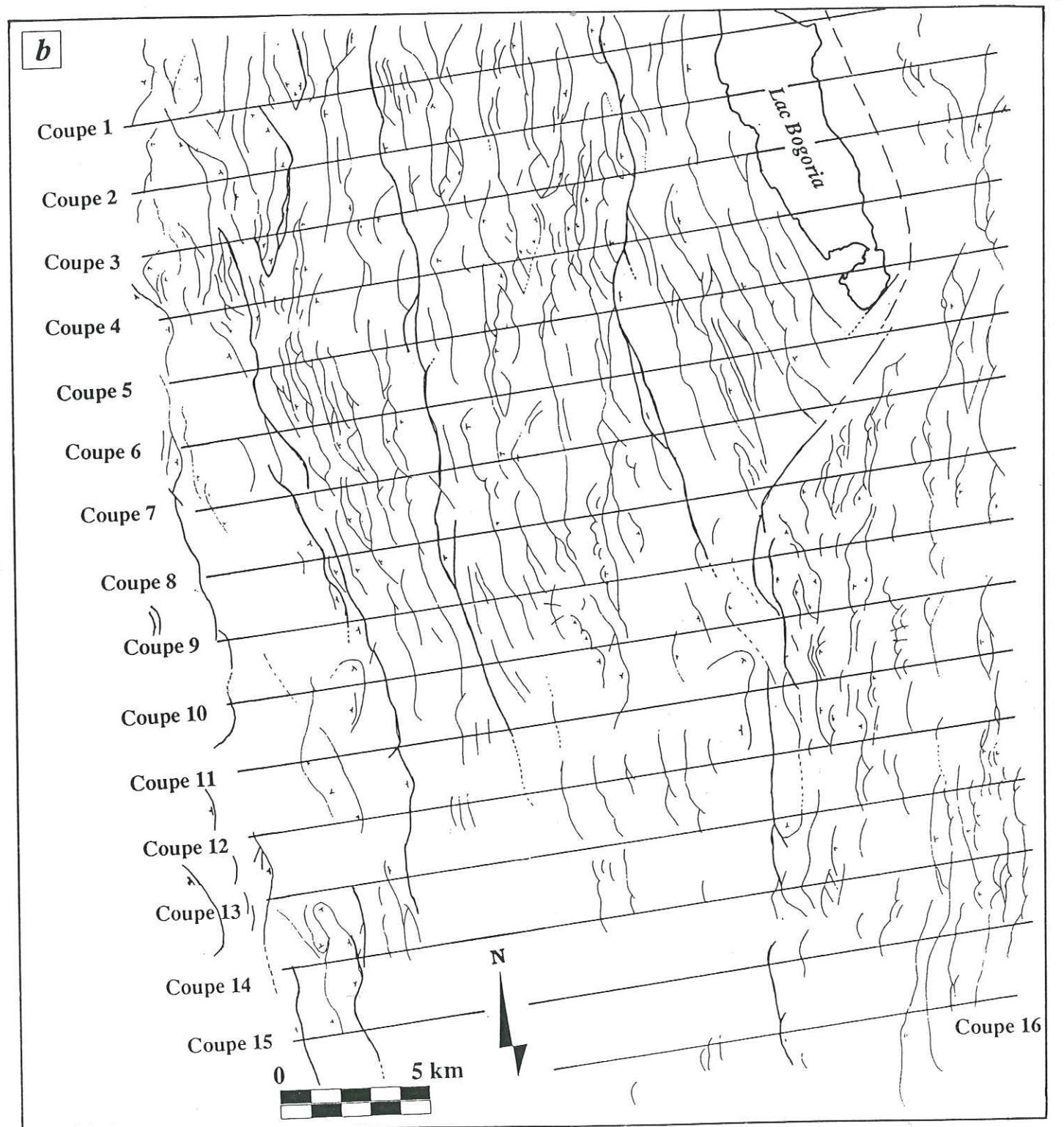


Figure IV.2 a- Extrait de la scène SPOT 137-350 couvrant une partie du Gregory Rift. La largeur de la scène est de 25 km environ; b- Interprétation structurale de la scène SPOT 137-350 et localisation des coupes transverses au rift. L'utilisation de ces coupes est présentée dans le paragraphe IV.2.1.



IV.1.4 Précision de l'interprétation

Les interprétations des images Landsat ont été réalisées sur des tirages au 1/500 000. La résolution d'une image Landsat étant de 30 m, la taille d'un pixel devient à cette échelle de 0,0625 mm. Le trait significatif de taille minimale, tracé sur l'interprétation structurale ou détecté sur les images, est de l'ordre du millimètre. Rapporté à l'image Landsat au 1/500 000, ce trait représente environ 16 pixels. Dans ce cas, les failles les plus petites tracées sur l'interprétation (mais également détectées sur les images) sont donc de 16 x 30 soit 500 m environ.

L'interprétation a été réalisée sur la scène SPOT principalement à l'échelle du 1/100 000. Pour une résolution au sol de 20 m des images multibandes SPOT, un pixel représente alors 0,2 mm. Cependant, la précision du tracé sur l'interprétation reste la même (1 mm environ soit 5 pixels). Selon le calcul réalisé précédemment, les plus petites failles détectées sur l'image ont une taille de 100 m.

IV.2 Quantification des paramètres de la fracturation du Gregory Rift

Pour les failles, les paramètres pouvant être quantifiés directement par imagerie sont leur direction, leur longueur, leur espacement, leur densité de répartition, ou même leur rejet et leur pendage en utilisant les propriétés stéréoscopiques des images. On peut également réaliser ce travail pour les blocs basculés (largeur, vergence). Il est également intéressant de connaître l'extension associée aux failles du secteur étudié, ou les relations éventuelles entre les différents paramètres caractérisant cette fracturation. Deux approches différentes sont envisagées :

- une analyse de chaque faille considérée comme un individu (longueur, orientation, rejet),
- une analyse de la population des failles, avec détermination de la densité de fracturation, de l'extension associée.

L'analyse de ces paramètres a été menée principalement dans deux secteurs. Le premier secteur référencé par la suite "*secteur du Gregory Rift*" correspond à la couverture totale donnée par les deux images Landsat 181-61 et 181-60. L'interprétation structurale et les mesures dans ce secteur sont réalisées au 1/500 000.

Le deuxième secteur référencé par la suite "*secteur de Bogoria*", correspond à une portion du secteur Gregory Rift. Il a pour limite est le lac Bogoria et s'étend à l'ouest sur 25 km environ. Il est couvert par l'image Landsat 181-60 et par l'image SPOT ce qui permettra de disposer de données sur la fracturation du secteur acquises avec une précision plus grande dans le cas de l'image SPOT.

IV.2.1 Analyse individuelle des failles

2.1.1 Méthode

Sur les interprétations de la mosaïque d'images Landsat ou sur les images SPOT traitées, les diverses mesures sont réalisées manuellement.

Direction

Du fait de la courbure en surface de la plupart des failles du Gregory Rift [McCall, 1967; Griffiths, 1980; Bahat, 1983; Vidal, 1985], les mesures de direction correspondent à la direction moyenne de la faille. Dans quelques cas, lorsque la courbure est trop prononcée (angle entre direction de la faille et direction moyenne, de part et d'autre du point d'inflexion, supérieur à 20°), la direction moyenne de la faille n'est plus significative, surtout si la faille est longue.

Dans ce cas, deux failles et donc deux directions sont considérées. Les mesures de direction sont réalisées dans les deux secteurs précédemment définis.

Longueur

Les longueurs des failles ont été mesurées au curvimètre, directement sur les interprétations, avec une incertitude de ± 1 mm. Les résultats sont exprimés en kilomètres.

Rejet

L'estimation du rejet à partir des images Landsat est délicat. En effet, on ne peut utiliser que les ombres portées, ce qui rend la mesure assez imprécise, plutôt qualitative et difficile pour les escarpements de failles situés face au soleil. Ainsi, pour ces images, ce paramètre n'a pas été quantifié.

Par contre, pour les images SPOT, en utilisant les propriétés stéréoscopiques, une estimation quantitative du rejet est réalisée de la façon suivante :

- classe 1 : rejet inférieur à 50 m,
- classe 2 : rejet compris entre 50 et 100 m,
- classe 3 : rejet compris entre 100 et 200 m,
- classe 4 : rejet compris entre 200 et 300 m,
- classe 5 : rejet supérieur à 300 m.

Le calage des classes de rejet s'effectue à partir de cartes topographiques au 1/100 000, sur lesquelles les escarpements de failles sont visibles. Ce découpage entraîne l'obtention d'un rejet moyen sur toute la faille. Ceci pose le problème de la variation du rejet le long de failles courbes et disposées en relais. Pour supprimer ce problème, les valeurs de rejet ont été estimées sur l'intersection entre chaque faille analysée et des coupes tracées en travers du rift dans le secteur Bogoria et sur l'image SPOT seulement (figure IV.2). Chaque coupe est distante de 2 km de la précédente, et perpendiculaire à l'axe d'allongement moyen du rift (environ N10).

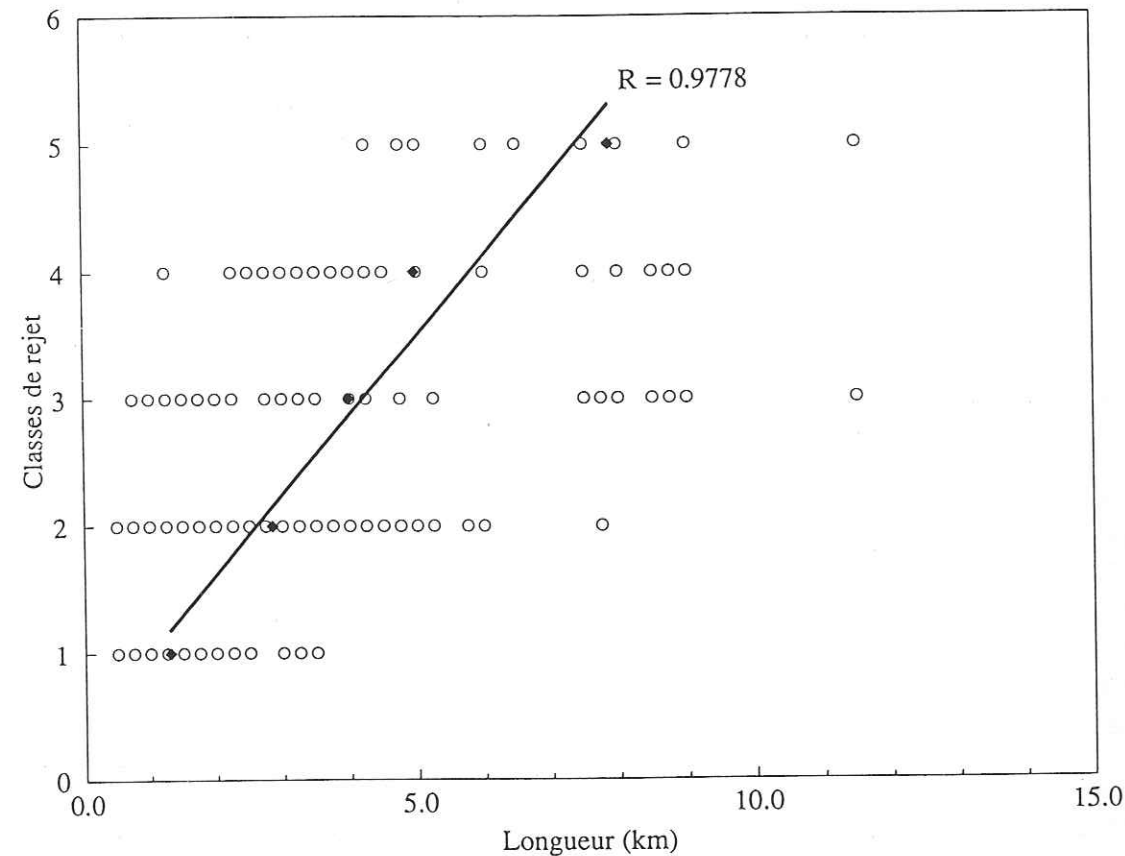
Espacement des failles

La réalisation de coupes, permettant d'estimer le rejet apparent le long de la faille de façon plus précise, donne accès à la distance qui sépare deux failles sur une coupe. De plus, les coupes étant repérées sur les images et transverses par rapport aux structures du rift, l'analyse de l'espacement pourra être réalisée depuis le centre du rift jusqu'à la périphérie. Les valeurs d'espacement mesurées directement sur les coupes, sont exprimées en kilomètres, depuis une origine prise à gauche des coupes (située près du centre du rift).

2.1.2 Analyse des résultats

La première étape de l'analyse de la fracturation est l'étude de l'évolution du rejet en fonction de la longueur des failles mesurées sur les images SPOT. La figure IV.3, construite à partir de toutes les failles mesurées sur les coupes dans le secteur de Bogoria, met en évidence une corrélation positive entre le rejet et la longueur de chaque faille.

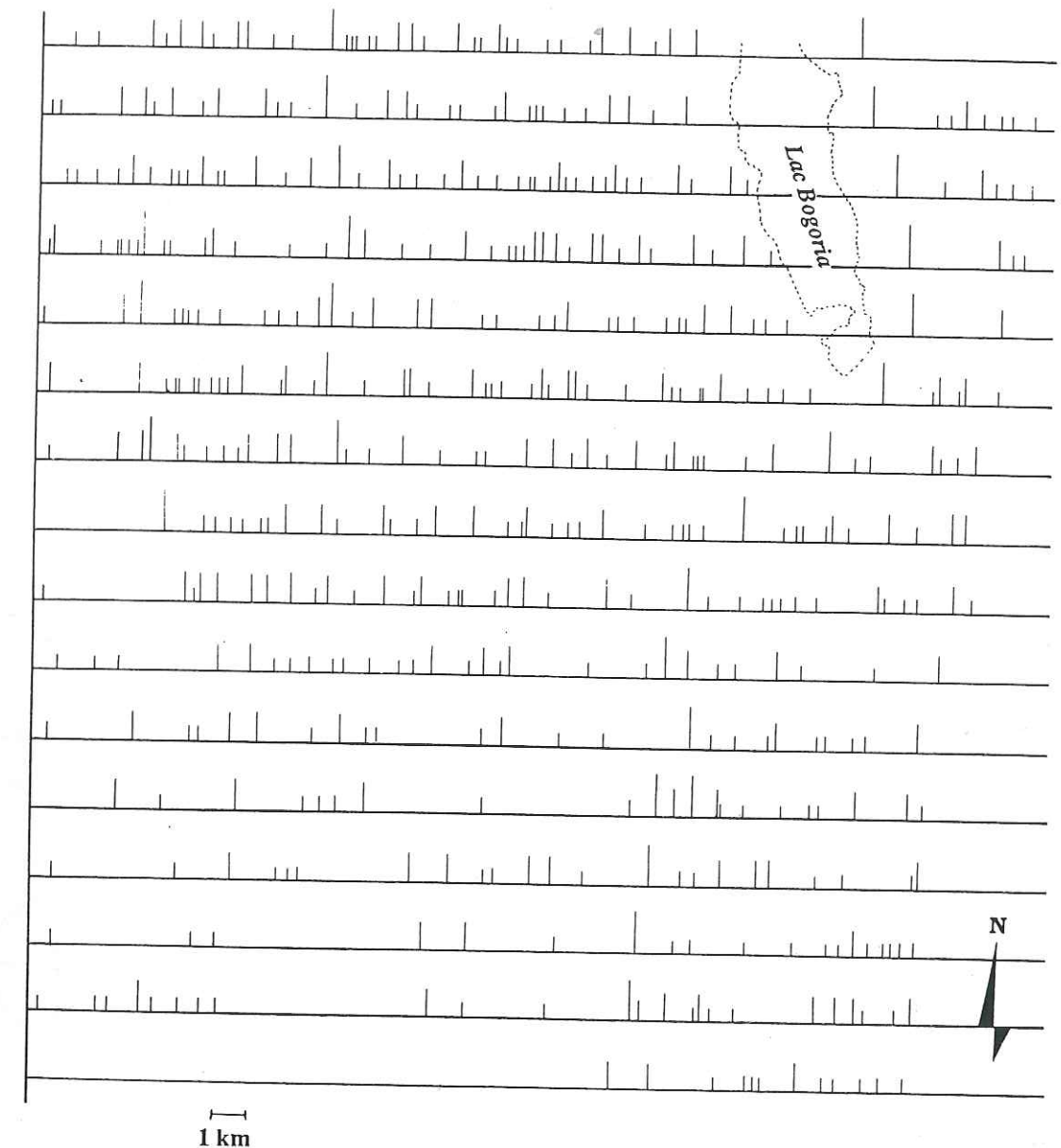
Figure IV.3 Longueur des failles en fonction de leur rejet. Le diagramme est construit pour les failles du secteur de Bogoria. Les symboles pleins représentent les valeurs moyennes de longueur pour chaque classe de rejet.



Ainsi, les failles longues (plus de 10 km) possèdent des rejets importants (plus de 300 m). Le nombre de classes de rejet définies étant faible, la dispersion des points sur la figure IV.3 est beaucoup plus importante en abscisse (longueur) qu'en ordonnée (rejet). Les valeurs moyennes de longueur sont alors calculées pour chaque classe de rejet. La droite de régression entre les points calculés confirme la corrélation positive entre rejet et longueur (coefficient de corrélation de 0.9778).

L'analyse de l'espacement entre les failles indique un découpage du rift en blocs basculés d'ordres différents (figure IV.4). Cette figure est construite à partir des failles mesurées sur les coupes. Chaque faille est représentée par une barre verticale proportionnelle à son rejet, à l'endroit précis où elle intercepte une coupe.

Figure IV.4 Répartition des failles depuis le centre du rift jusqu'aux bords du rift. Chaque barre verticale représente le rejet estimé de la faille. L'origine des coupes est placée à gauche, et correspond à l'axe du rift.

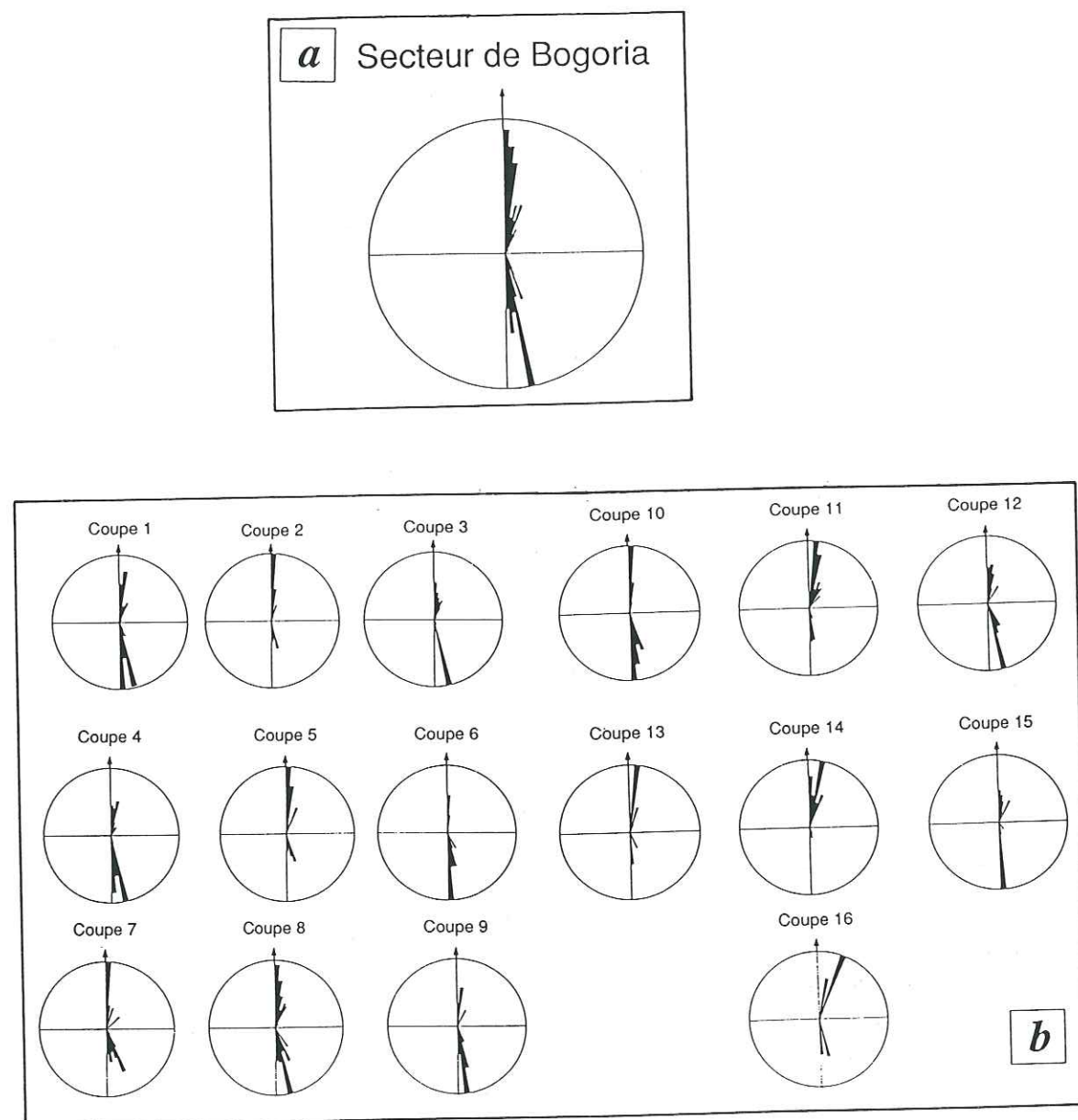


Des failles à fort rejet (et donc les plus longues) limitent des blocs basculés assez larges (15 km environ). Ces blocs de premier ordre sont eux-mêmes découpés par des failles plus courtes et beaucoup moins espacées qui limitent ainsi des blocs de deuxième ordre, moins larges (5 km et 2 km). Ce découpage concerne seulement la répartition des blocs à la surface du rift, mais ne fournit pas d'informations sur le basculement éventuel de ces différents blocs. La répartition des failles indique également que les failles les plus longues (plus de 15 km) sont les plus éloignées du centre du rift (failles bordières).

L'analyse des orientations des failles mesurées sur le même secteur (image SPOT) permet de retrouver les trois directions principales N10, N60 et N140 décrites par différents auteurs [Baker et al, 1972; Vidal, 1985] (figure IV.5). Compte-tenu de leur faible nombre, les failles d'orientation N60 et N140 sont moins bien représentées. L'analyse des directions des failles mesurées sur chacune des coupes montre que la répartition des failles N10, N60 ou N140 n'est

pas homogène sur l'ensemble du secteur (différences entre les coupes 4, 7 et 16 sur la figure IV.5b par exemple).

Figure IV.5 Analyse des orientations des failles sur l'image SPOT. a- Rosace de directions de toutes les failles mesurées sur le rift; b- Rosaces des directions des failles mesurées sur chacune des coupes.



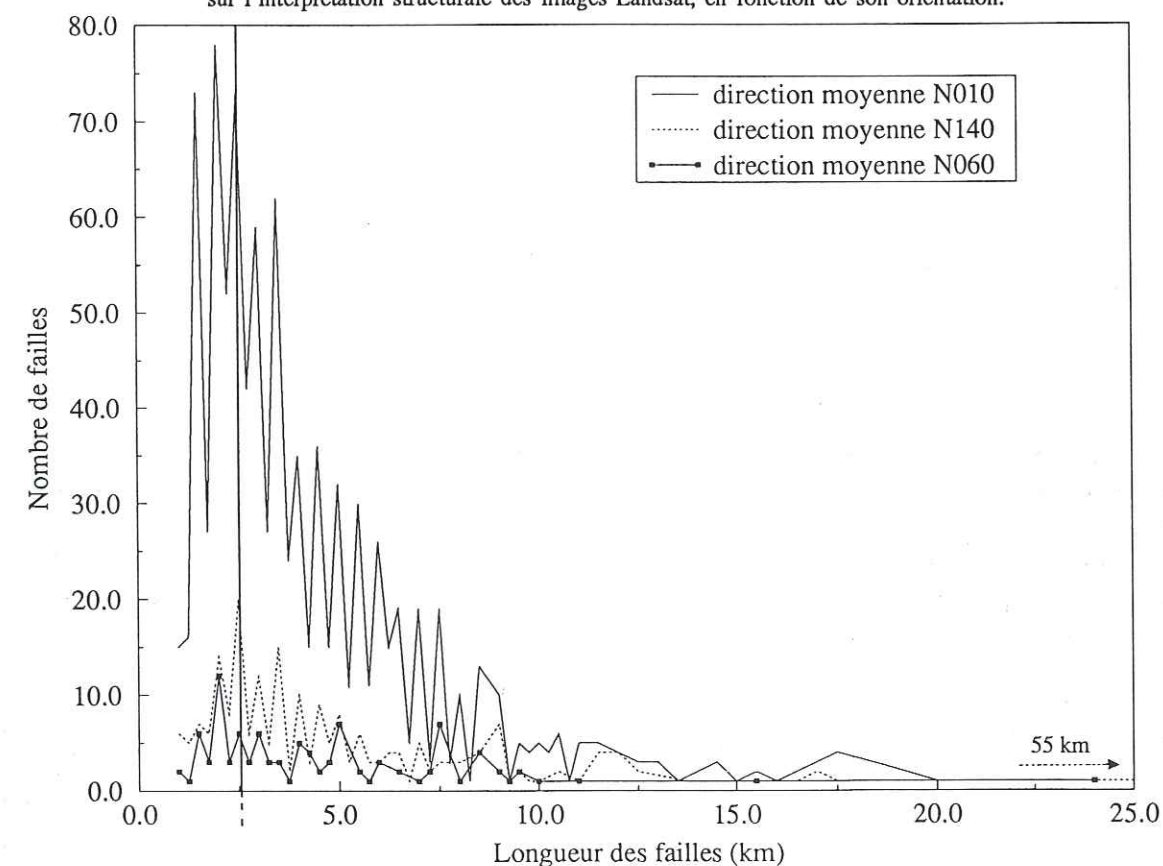
Les analyses décrites précédemment concernent le secteur de Bogoria et son interprétation à partir des scènes SPOT. Les résultats montrent un découpage latéral du rift en blocs basculés imbriqués, séparés par des failles de longueur et de rejet proportionnels à la largeur des blocs. Ce secteur couvre la partie sud du bassin de Baringo-Bogoria ainsi que la zone d'accommodation qui sépare ce bassin de celui de Nakuru-Naivasha (figures IV.1b et IV.2). L'analyse des orientations des failles le long de coupes transversales indique des variations dans la répartition des failles entre le bassin de Baringo-Bogoria (coupes 1 à 6) et la zone d'accommodation (autres coupes). Pour analyser la fracturation dans tout le secteur du Gregory Rift, et compte-tenu des indéterminations sur la mesure du rejet, l'analyse de la distribution des longueurs de faille est préférée.

2.1.3 Distribution des longueurs de failles

Le choix de cette analyse est également motivé par le fait que des études dans d'autres contextes géologiques ont démontré les intérêts de la caractérisation des longueurs de failles pour la description de la déformation cassante à différentes échelles [Nur, 1982; Krantz, 1983; Gudmunsson, 1983; Villemin et Sunwoo, 1987; Davy et al, 1990; Merceron et al, 1991; Vignes-Adler et al, 1991], pour la caractérisation de réservoirs pétroliers [Childs et al, 1990; Walsh et Watterson, 1991] ou pour l'élaboration de modèles de croissance de failles [Cox et Scholz, 1988; Scholtz et Cowie, 1990; Sornette et Davy, 1991; Cowie et Scholtz, 1992c].

L'analyse des longueurs de failles est réalisée en calculant le nombre de failles d'une longueur donnée et le nombre cumulé de failles supérieures à une longueur donnée, sur l'interprétation du secteur du Gregory Rift. L'analyse du diagramme IV.6 montre un maximum de failles aux environs de 2,5 km de longueur.

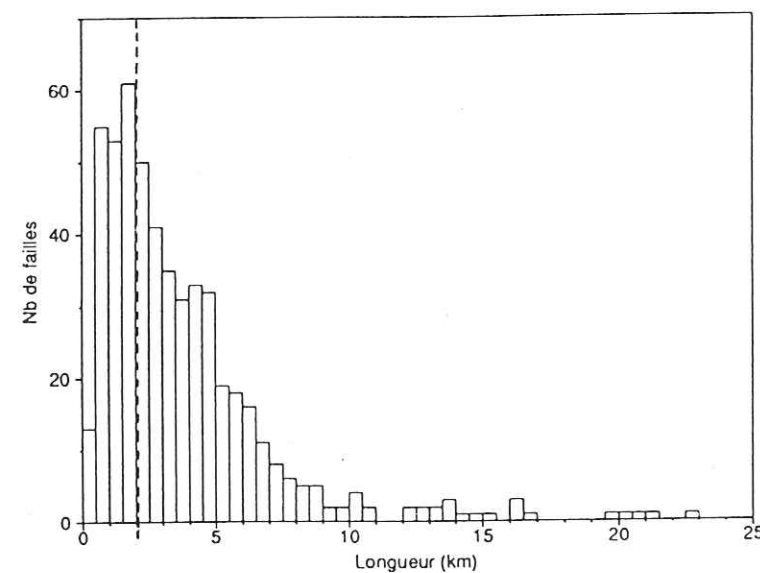
Figure IV.6 Répartition du nombre de failles pour une longueur donnée, mesurée sur l'interprétation structurale des images Landsat, en fonction de son orientation.



On peut expliquer la décroissance du nombre de failles courtes (inférieures à 3 km) par la résolution des données utilisées. Compte-tenu de l'échelle à laquelle sont réalisées les interprétations des images Landsat (1/500 000), toutes les failles dont la longueur est inférieure à 2,5 km ne sont pas identifiées. Le nombre réel de ces failles est probablement plus important que celui obtenu. Des travaux réalisés sur le même type de structures [Nur, 1982] montrent une distribution exponentielle des longueurs de failles ce qui semble en accord avec la distribution obtenue sur le Gregory Rift, au moins pour les failles supérieures à 2,5 km de long. De plus, les longueurs de coupure en-dessous desquelles les données ne sont plus significatives sont décrites dans d'autres études [Davy et al, 1990; Childs et al, 1990; Sornette et Davy, 1991; Marrett et Almendinger, 1992]. Cependant, l'analyse de la distribution des failles, réalisée sur le secteur

Bogoria à partir des images SPOT [Cardon, 1992], indique une longueur de coupure située également à 2,5 km.

Figure IV.7 Histogramme du nombre de failles en fonction de leur longueur [d'après Cardon, 1992]. Les failles sont mesurées dans le secteur de Bogoria, à partir de l'interprétation structurale des images SPOT.



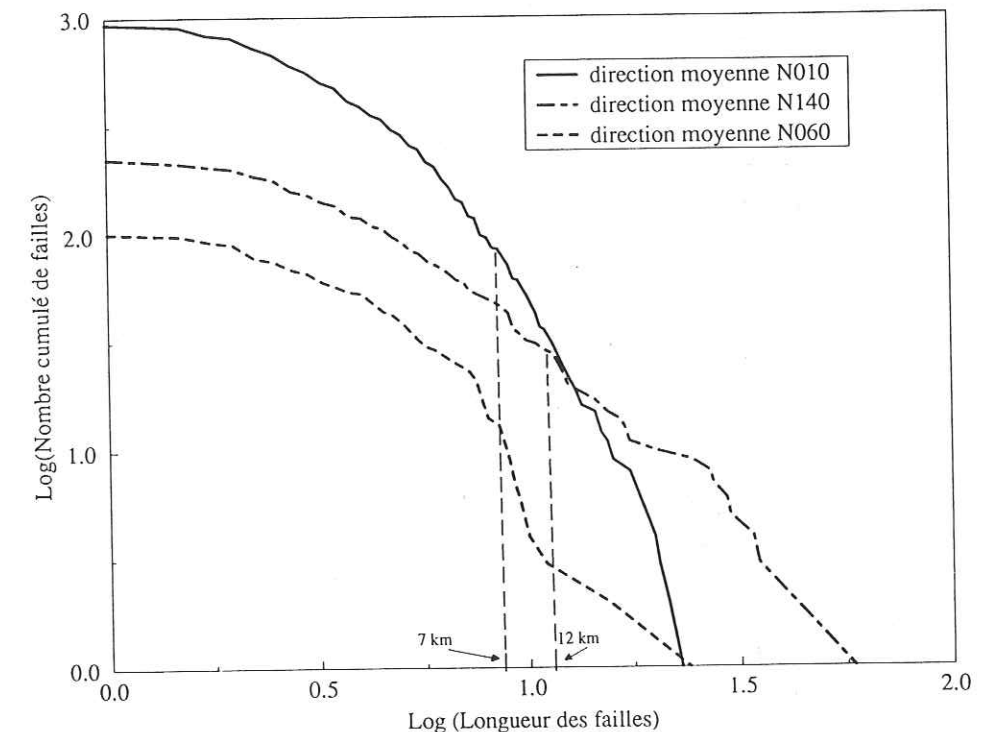
Compte-tenu de la résolution de l'interprétation des images SPOT au 1/100 000, les mesures réalisées permettent de distinguer des failles d'une longueur de 500 m, c'est-à-dire de longueur inférieure à 2,5 km. L'interprétation donnée à cette observation est l'existence de deux lois de distribution différentes selon la longueur des failles. Des failles de longueur inférieure à 2,5 km montrent une distribution gamma (somme de lois exponentielles) alors que les failles supérieures à 2,5 km suivent une distribution exponentielle [Vidal et al, 1993].

La deuxième étape dans l'analyse de la distribution des longueurs consiste à suivre l'évolution du nombre de failles supérieures à une longueur donnée. Cette analyse est réalisée pour chacune des orientations mises en évidence sur le Gregory Rift, et qui ont une signification particulière [Baker et Wollenberg, 1971; Griffiths, 1980; McConnell, 1980; Vidal, 1985; Bosworth, 1987; Chorowicz et al, 1987]. La représentation des résultats sur la figure IV.8, est réalisée dans un diagramme en échelle logarithmique.

Ce diagramme montre une distribution voisine pour les groupes de failles N140 et N60 analysés alors que la distribution des failles N10 semble différente. La courbe correspondant aux failles N60 est parallèle à celle des failles N140. Elle est située en-dessous, du fait d'un nombre total de failles moins important. La longueur maximale atteinte par les failles N140 (environ 50 km) est beaucoup plus importante que pour les deux autres groupes. Enfin, les courbes de distribution montrent des ruptures de pente pour des longueurs caractéristiques, au-delà desquelles la distribution des longueurs change, et ceci quelque soit l'orientation des failles (figure IV.8). Par exemple, on retrouve une rupture de pente, sur les trois courbes construites, pour une longueur de 7 km environ. Une autre rupture de pente est observée pour les courbes

correspondant aux directions N60 et N140, à environ 12 km.

Figure IV.8 Diagramme du nombre cumulé de faille pour une longueur donnée. Les failles sont mesurées sur l'interprétation structurale des images Landsat. La distribution est calculée pour chaque famille de failles, distinguée selon sa direction moyenne



L'interprétation de ces résultats est regroupée avec ceux issus de l'analyse de la population de failles et fait l'objet du paragraphe IV.3

IV.2.2 Analyse de la population de failles

2.2.1 Méthode

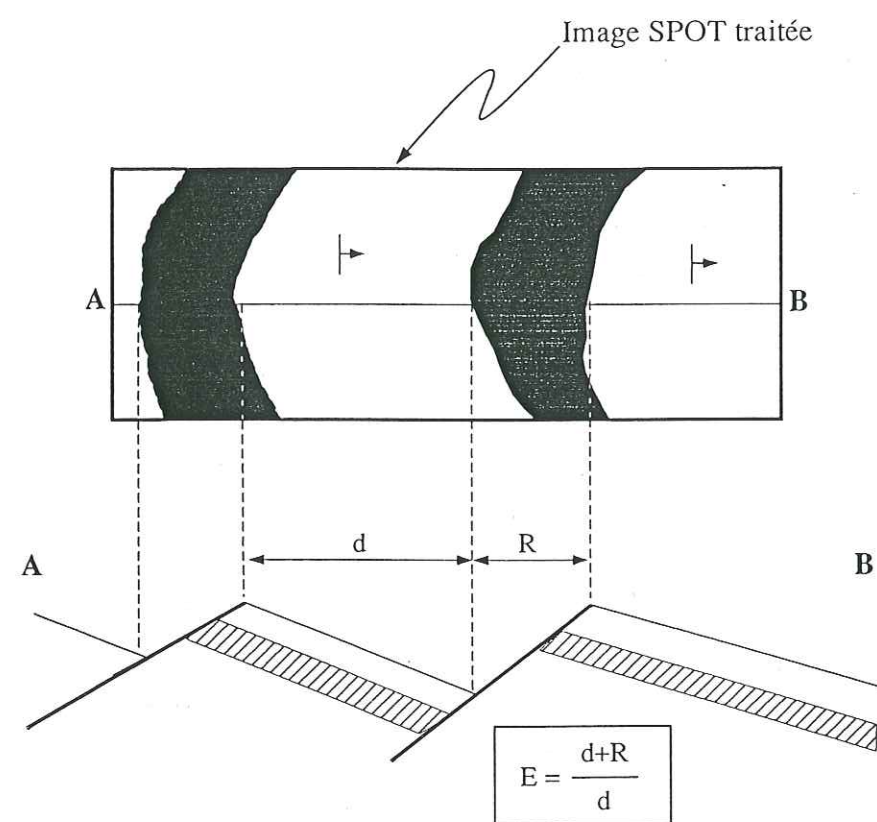
Les mesures réalisées au cours de cette analyse concernent :

- la densité de fracturation et la distribution des failles dans le secteur du Gregory Rift,
- la distribution des longueurs cumulées de failles et la quantification de l'extension pour le secteur de Bogoria.

Extension

L'analyse de l'extension dans le secteur de Bogoria a été réalisée sur chacune des coupes définies dans le paragraphe précédent (figure IV.2). Par contre, les mesures ont été faites directement sur l'image SPOT 137-350, traitée et seuillée afin de mettre en évidence les failles. Pour chaque faille, la largeur de la trace de l'escarpement sur l'image est assimilée au rejet. Ceci permet d'obtenir une estimation du rejet horizontal de la faille, considéré en première approximation comme proportionnel au rejet vertical. Ceci permet également de disposer de valeurs discrètes de rejet, plutôt que d'un nombre de classes limité. La figure IV.9 illustre le principe de calcul de l'extension d'après Chenet et al [1982], et appliqué à l'analyse des failles par imagerie.

Figure IV.9 Principe de l'estimation de l'extension à partir de l'identification des failles sur les images SPOT.



Distribution des longueurs cumulées de failles

La longueur cumulée de toutes les failles interceptant une coupe donnée, définie sur le secteur de Bogoria est calculée et son évolution d'une coupe à l'autre analysée, en fonction du nombre de failles par coupe.

Densité de fracturation

Le travail est réalisé sur le secteur du Gregory Rift, à partir des interprétations structurales des images. Vialon et al [1976] définissent la densité de fracturation comme étant la fréquence cumulée de chaque groupe de failles présent dans le système et défini par son orientation. La fréquence correspond au nombre d'individus par unité de surface ou de volume d'un horizon-repère. Sur l'ensemble de la surface analysée, le nombre de coulées de laves étant important, il est difficile de définir avec précision un horizon particulier. De plus, la densité est calculée pour chaque groupe de failles d'orientation donnée. Or, c'est la densité de fracturation de l'ensemble du secteur étudié qui doit être caractérisée. La densité de fracturation a donc été définie comme la longueur cumulée des failles présentes sur une surface donnée, d'après la définition donnée par Villemin [1987]. L'interprétation des scènes Landsat est découpée en carrés de taille donnée, dans lesquels, la longueur cumulée des failles est mesurée. La densité est obtenue en faisant le rapport entre longueur cumulée et surface du carré.

2.2.2 Analyse des résultats

Les valeurs d'extension estimées sur les coupes radiométriques issues d'images SPOT sont données dans le tableau IV.10 :

Tableau IV.10 Valeurs des quantités d'extension associées aux failles interceptant chaque coupe transverse au rift. Ces coupes sont construites sur l'interprétation structurale des images SPOT du secteur de Bogoria.

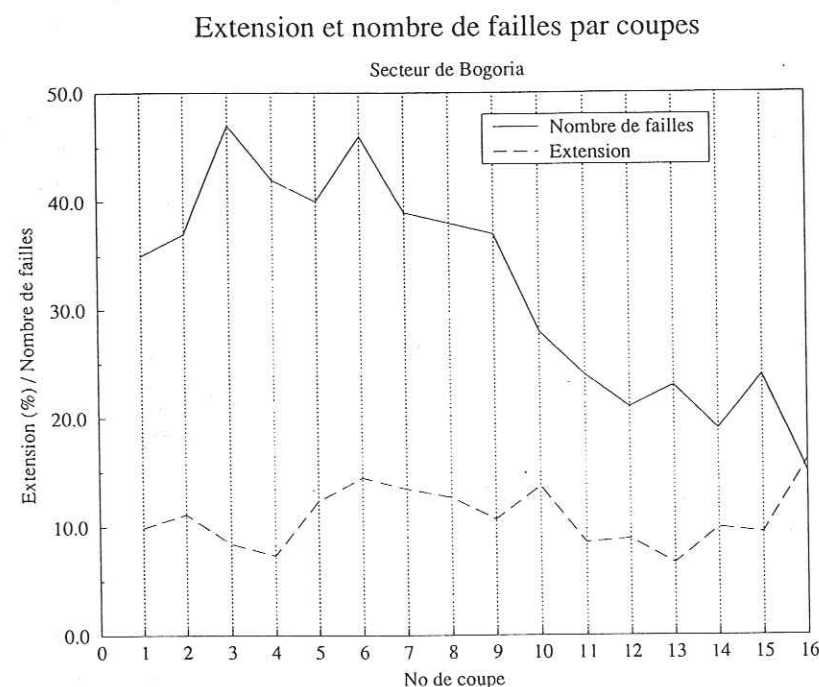
Numéro de la coupe	Extension estimée (%)
1	9,90
2	11,13
3	8,42
4	7,36
5	12,34
6	14,48
7	13,47
8	12,69
9	10,66
10	13,74
11	8,57
12	8,89
13	6,66
14	9,91
15	9,46
16	16,13

Ces valeurs d'extension fluctuent de façon importante d'une coupe à l'autre (entre 6,66% et 16,13%). Les valeurs sont faibles de la coupe 1 à la coupe 4, puis plus fortes pour les coupes 5 à 10 et à nouveau plus faibles ensuite. Les coupes au travers la zone d'accomodation (figures IV.1b et IV.2) présentent une quantité d'extension plus importante que les coupes situées dans les bassins. Cependant, de telles variations dans la quantité d'extension ne sont possibles que s'il existe des décrochements ou des failles de transfert entre les différentes zones, permettant d'accomoder les variations dans la déformation. L'analyse des images SPOT ne permet pas de conclure en faveur de l'existence de telles structures majeures. Il est plus probable que l'estimation de l'extension réalisée ici soit soumise à d'importantes erreurs analytiques. Ces erreurs proviennent de la non-prise en compte du pendage des failles, ce qui ne permet pas de distinguer les éventuels décrochements, ou les mouvements décrochants sur les failles normales. Elles proviennent aussi de l'approximation réalisée lors de la mesure du rejet directement sur les images SPOT, où seule la composante horizontale est prise en compte (différence entre failles normales et décrochements). Ces remarques nécessitent d'utiliser les quantités d'extension avec précaution et montrent surtout les limites de cette méthode de mesure, à partir des seules images satellitaires.

L'analyse de l'évolution des valeurs de longueurs cumulées de faille d'une coupe à l'autre (figure IV.11), longitudinalement par rapport au rift, montre une variation inversement proportionnelle au nombre de failles par coupe. Ceci indique que les failles situées au sud de la coupe

6 (zone d'accomodation) sont moins nombreuses mais plus longues, à l'inverse de celles qui caractérisent la zone située au nord de cette coupe (bassin de Baringo-Bogoria).

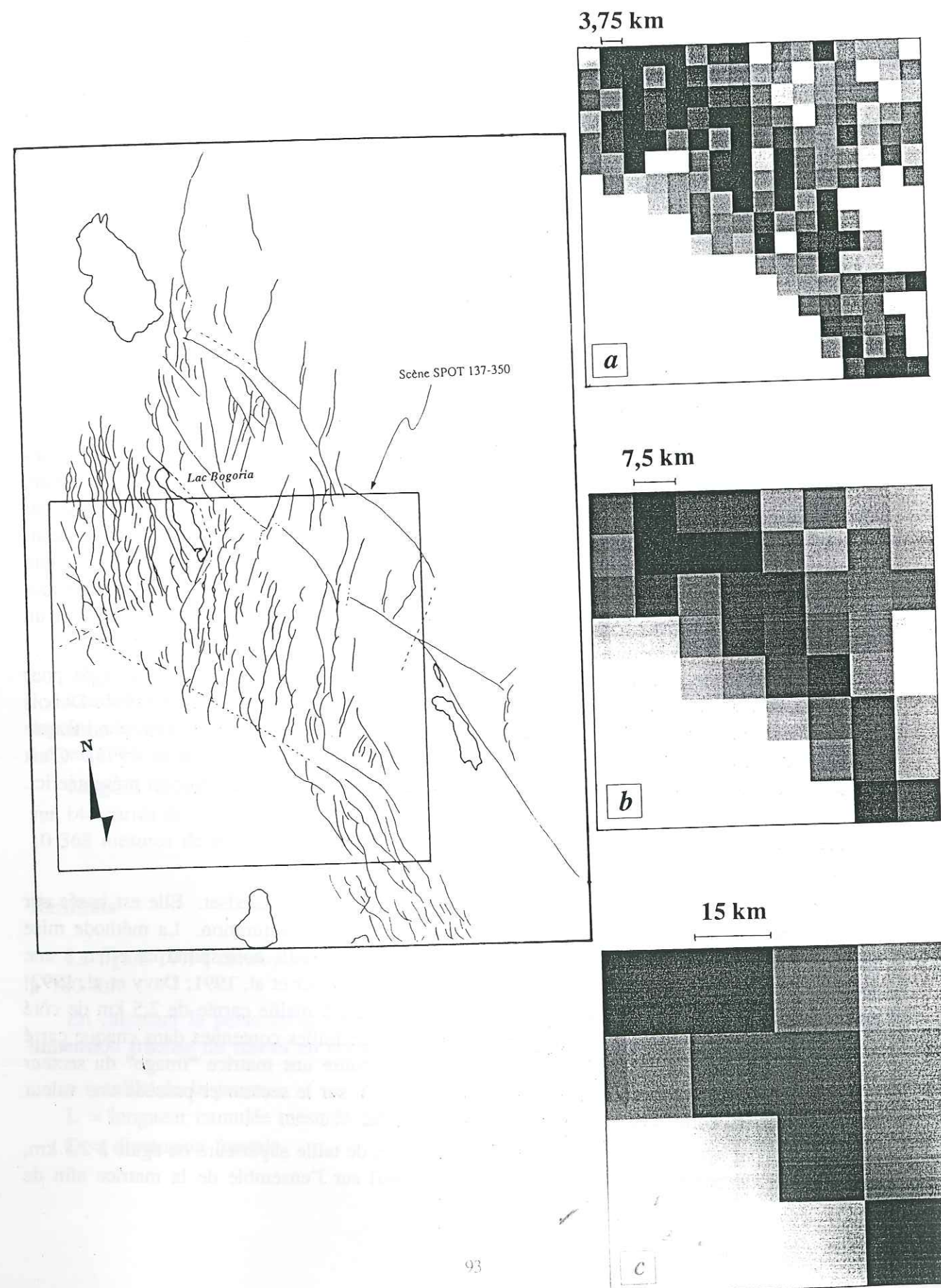
Figure IV.11 Evolution longitudinale de la longueur cumulée des failles et du nombre de failles par coupe, dans le secteur de Bogoria, depuis le bassin de Bogoria-Baringo (coupe 1) en direction du bassin de Nakuru-Naivasha (coupe 16).



La superposition d'une grille régulière à maille carrée de taille variable, sur l'interprétation structurale de la totalité de l'image SPOT (secteur un peu plus grand que le secteur de Bogoria sensu-stricto) permet de calculer la densité de répartition des failles sur le secteur (figure IV.12a). Pour permettre une comparaison de la densité calculée pour chaque point du rift, la représentation choisie est une visualisation en surface, sous la forme de carrés en niveaux de gris (programme *visurf.c*). La figure IV.12a illustre le résultat obtenu, pour des carrés d'analyse dont le côté mesure 3,75 km. La densité de fracturation est d'autant plus importante que la teinte du carré est sombre.

Cette représentation sur l'ensemble du secteur de Bogoria permet de distinguer les zones de localisation de la déformation, comme à l'ouest du Lac Bogoria, avec de nombreuses failles courtes. Dans les deux cadrans Nord-Est et Sud-Est, la densité est moindre. C'est dans ces cadrans que se développent des failles plus longues, mais également plus espacées. Ce résultat est à rapprocher du découpage du rift en blocs basculés d'ordre différent visualisé par l'évolution de la position des failles du centre jusqu'au bord du rift (figure IV.4). Il permet aussi de distinguer des zones où les failles sont longues mais peu nombreuses par opposition à d'autres où des failles plus courtes et moins espacées se développent. Ceci traduit les différences structurales entre le bassin de Baringo-Bogoria au Nord, et le bassin de Nakuru-Naivasha au Sud.

Figure IV.12 Interprétation structurale simplifiée du secteur étudié et densité de fracturation associée. La densité est obtenue respectivement à partir d'un carré de (a) 3,75 km, (b) 7,5 km et (c) 15 km de côté.



Pour la mesure de la densité, le découpage du secteur de Bogoria en carrés juxtaposés de 3,75 km de côté permet d'utiliser une surface de référence plus grande que la longueur de la plus petite faille identifiable sur l'interprétation (2,5 km environ). Il permet également d'envisager une mesure de cette densité sur le secteur de Bogoria, à l'aide d'une jauge carrée de taille variable. Les mesures obtenues pour des carrés de 7,5 et 15 km de côté, sont illustrées sur la figure IV.12b. Cette approche et la comparaison des résultats pour différentes largeurs de carrés permet d'aborder la notion de facteur d'échelle c'est-à-dire l'évolution de la distribution de la fracturation en fonction de l'échelle d'observation. Les résultats de l'analyse de la distribution des longueurs de failles avaient déjà permis d'évoquer cette notion avec par exemple l'existence possible de plusieurs lois de distribution selon la taille des failles. La question de l'auto-similarité du réseau de failles en terme de densité de la fracturation est alors envisageable. Pour essayer de répondre à cette question, une analyse de la géométrie fractale de ce réseau a donc été effectuée.

Plusieurs calculs sont réalisés, en faisant varier la taille du carré. La représentation des données concernant la densité de fracturation est réalisée en tenant compte à chaque fois de la taille du carré utilisé pour le calcul.

2.2.3 Dimension fractale

Notion de géométrie fractale en géologie

L'auto-similarité d'un objet est obtenue si chaque partie de cet objet reste similaire à elle-même, à un facteur d'échelle près [LeMéhauté, 1981]. L'utilisation de la géométrie fractale, notion introduite par Mandelbrot [1977], permet de quantifier cette notion d'auto-similarité par description d'un objet à l'aide d'une jauge donnée et calcul de sa dimension. Ceci conduit à l'obtention d'une dimension entière ou non, correspondant à la dimension fractale. Cette dimension obtenue est contraire aux attentes de la géométrie euclidienne qui enseigne que tout objet possède une dimension entière (une ligne a une dimension de 1, une surface de 2 et un volume de 3 par exemple).

L'application de la géométrie fractale à des objets géologiques a déjà été envisagée pour décrire la répartition de la fracturation, de l'échelle macroscopique [Velde et al, 1990; Dubois et al, 1991; Merceron et al, 1991; Velde et al, 1991] à l'échelle de la déformation continentale [Scholtz et Cowie, 1990; Davy et al, 1990; Davy et al, 1992; Matsumoto et al, 1992]. C'est l'application de telles méthodes à un contexte extensif et à l'échelle du rift qui est présentée ici.

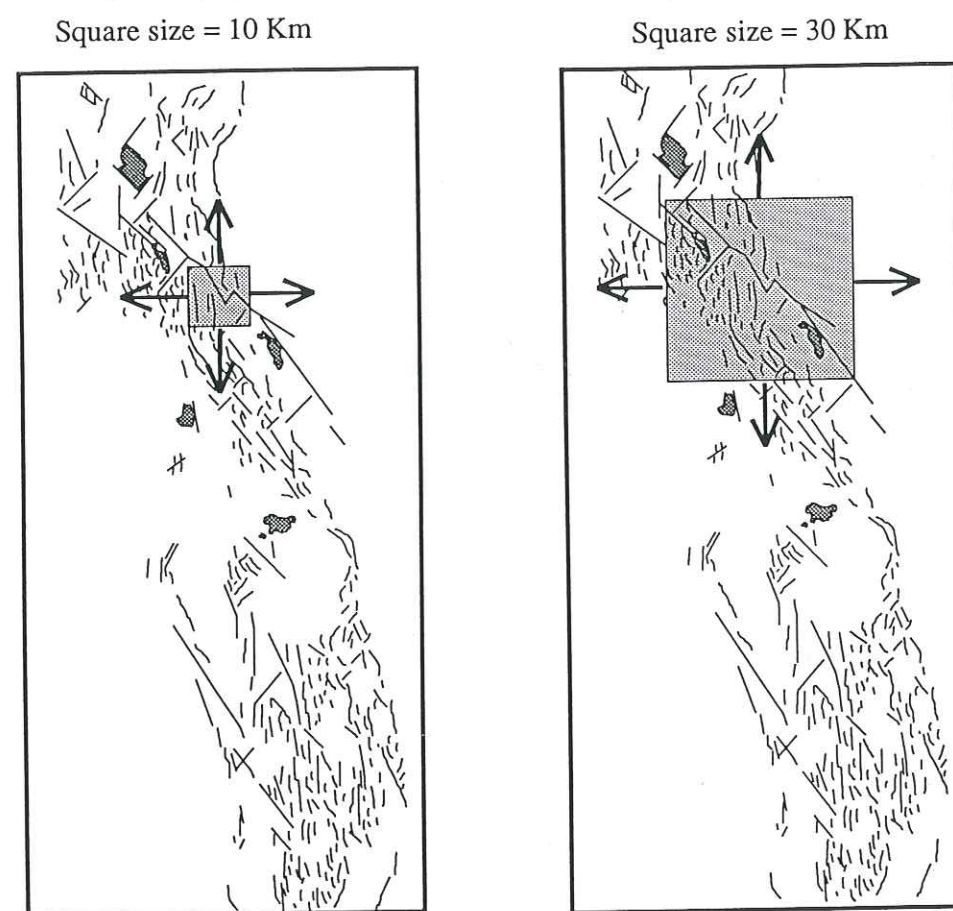
Principe de mesure

L'étude est réalisée sur l'interprétation géologique des scènes Landsat. Elle est basée sur le même principe que celui utilisé pour calculer la densité de fracturation. La méthode mise au point pour déterminer la dimension fractale du réseau de faille correspond en effet, à une méthode de type "box-counting" [Davy et al, 1990; Vignes-Adler et al, 1991; Davy et al, 1992] mais adaptée aux données particulières utilisées. Une grille à maille carrée de 2,5 km de côté est superposée à l'interprétation et la longueur cumulée de failles contenues dans chaque carré de cette maille est alors calculée. Ceci permet de construire une matrice "image" du secteur étudié. Chaque carré est repéré par sa position en X et Y sur le secteur et possède une valeur de "radiométrie" correspondant à une longueur cumulée.

Ensuite, par itérations successives, une jauge carrée, de taille supérieure ou égale à 2,5 km, est déplacée de proche en proche (avec un pas choisi) sur l'ensemble de la matrice afin de

déterminer à chaque position de la jauge, la longueur cumulée de failles qu'elle contient (figure IV.13) (programme *iterate.c*).

Figure IV.13 Principe de mesure de la dimension fractale sur le réseau de failles du secteur du Grégory Rift. La jauge utilisée (carré) est déplacée sur la totalité de l'image du réseau et la longueur cumulée calculée pour chaque position de la jauge. Ce travail est effectué pour plusieurs tailles de jauge.



Les valeurs de longueur cumulée obtenues, pour chaque déplacement de la jauge, sont alors représentées sur un graphique en échelle logarithmique, en fonction de la taille de cette jauge. Le calcul est ensuite recommencé de nombreuses fois, en faisant varier la taille de la jauge.

La grille utilisée pour couvrir le segment du rift possède une taille de 72 carrés de large sur 144 carrés de long, chaque carré étant de 5 km de côté, soit 2,5 km. Ceci représente donc 10 368 mesures de longueur cumulée.

Résultats

La figure IV.14 correspond aux résultats obtenus pour des tailles de jauge variant de 2,5 à 180 km.

En calculant la pente de la courbe ainsi obtenue, on peut alors exprimer la valeur de la dimension fractale du réseau en écrivant $L(s) \simeq s^D$, avec :

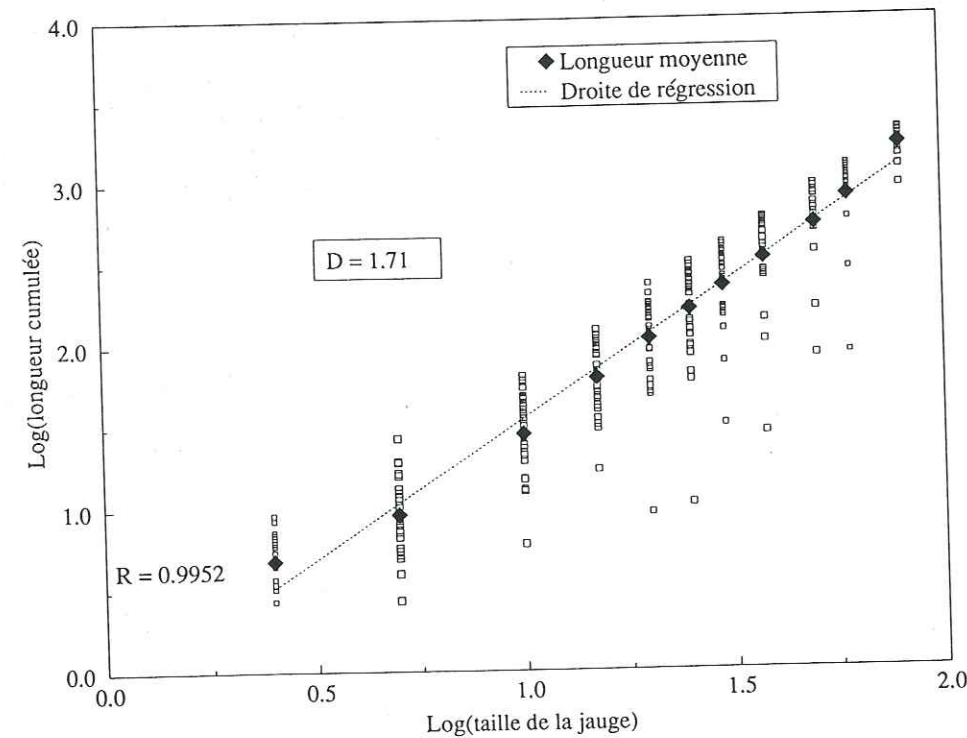
s = taille de la jauge,

L = longueur cumulée mesurée pour s donnée,

D = dimension fractale.

Il faut noter qu'en pratique, D correspondant à la pente de la courbe obtenue, calculée par régression linéaire. Les configurations de la jauge pour lesquelles la longueur cumulée était inférieure à 2,5 km, ont été systématiquement éliminées (limite inférieure de résolution de l'interprétation du secteur du Gregory Rift).

Figure IV.14 Résultats de la mesure de la dimension fractale sur le Gregory Rift.. Les losanges noirs représentent le logarithme de la longueur cumulée moyenne obtenue pour une taille donnée de la jauge. La droite de régression est calculée à partir de ces points.

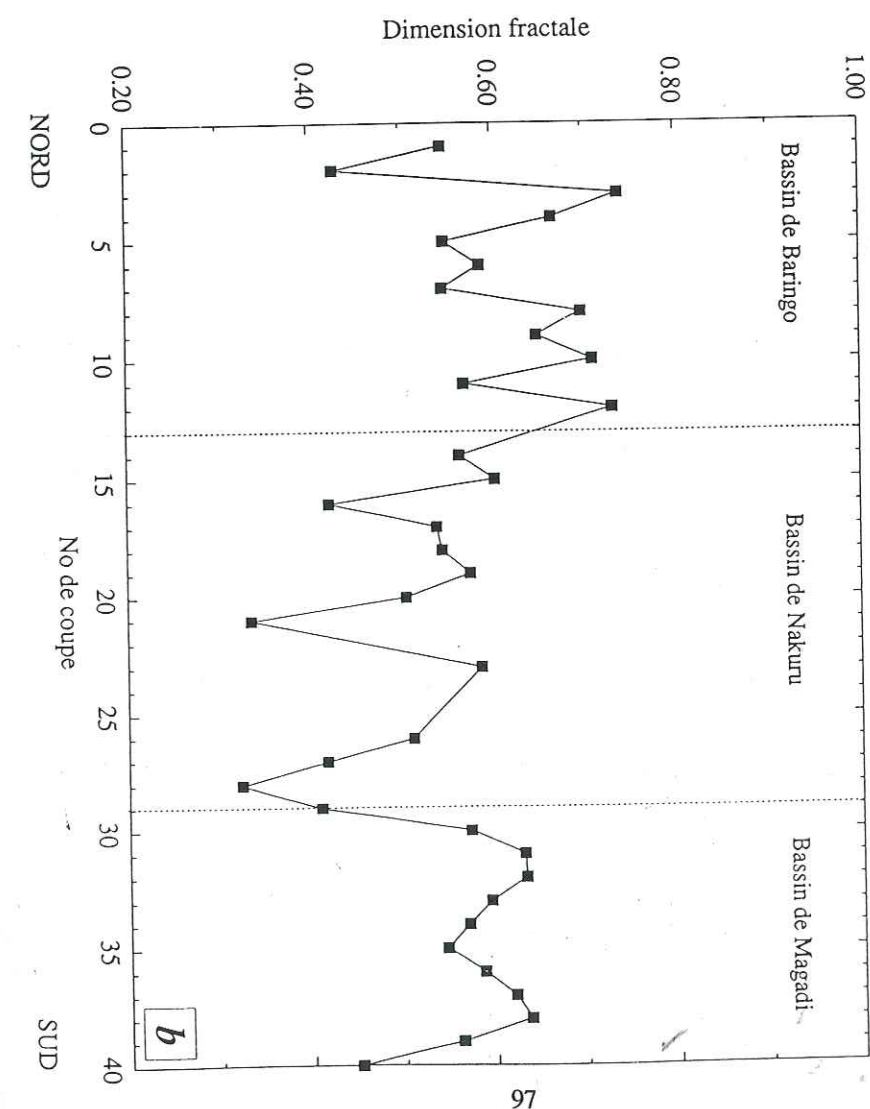
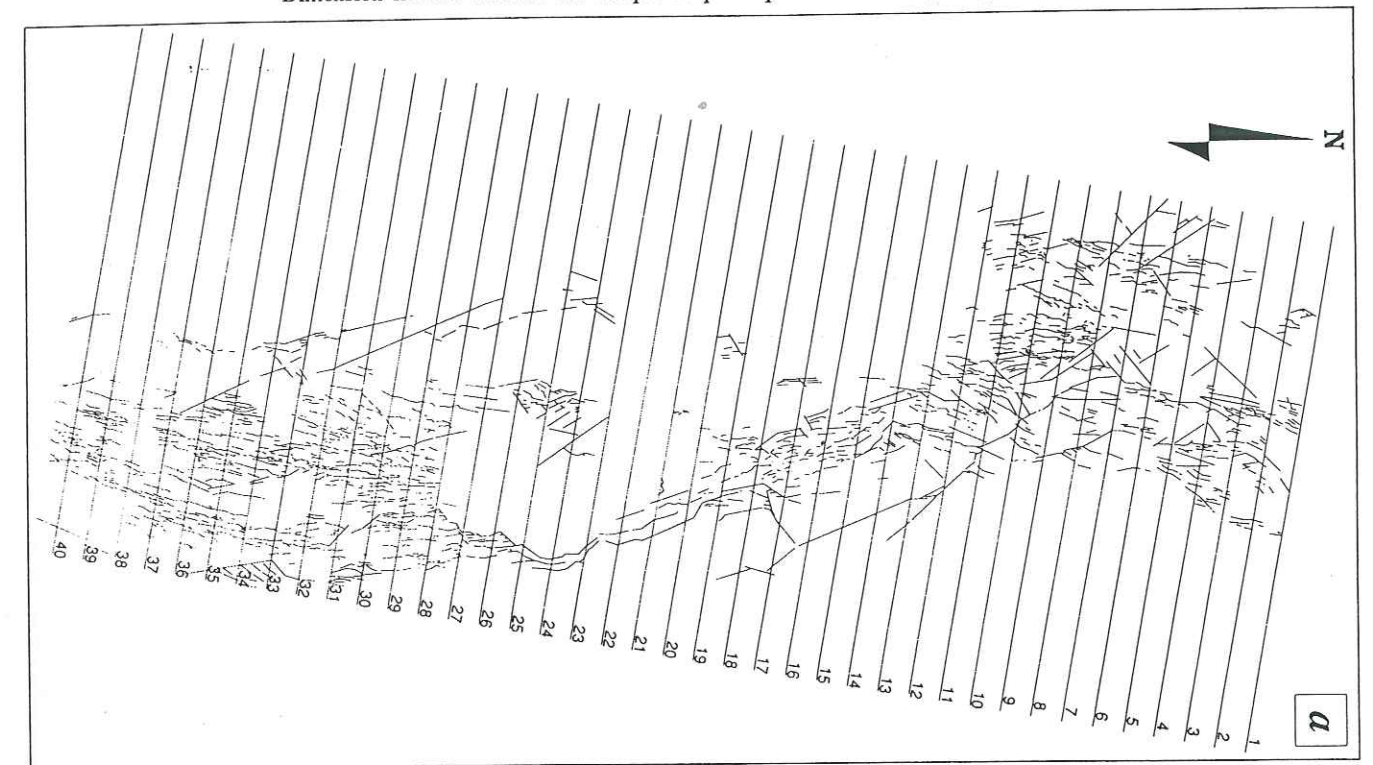


La valeur de la pente de la courbe obtenue donne $D = 1,71 \pm 0,02$, avec un coefficient de corrélation de 0,9952.

La dimension fractale a également été mesurée le long de coupes perpendiculaires à la direction d'allongement moyenne du rift [Vidal et al, 1993]. La dimension fractale est calculée par une méthode différente de la précédente, le long d'une ligne (coupe transverse au rift), découpée en segments réguliers. Le nombre de segments interceptés par au moins une faille sont alors comptabilisés [Cardon, 1992]. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure IV.15.

Les valeurs de dimension fractale sont beaucoup plus faibles entre les coupes 14 à 29. La diminution de la dimension fractale est corrélée à la localisation de sa mesure. Ainsi, la dimension fractale semble plus faible dans le bassin de Nakuru-Naivasha que dans les deux bassins qui l'encadrent. Ce résultat est à rapprocher des caractères structuraux différents de ces trois bassins (orientation moyenne des structures par exemple).

Figure IV.15 a- Localisation des coupes le long du Gregory Rift; b- Dimension fractale calculée sur chaque coupe d'après Vidal et al [1993].

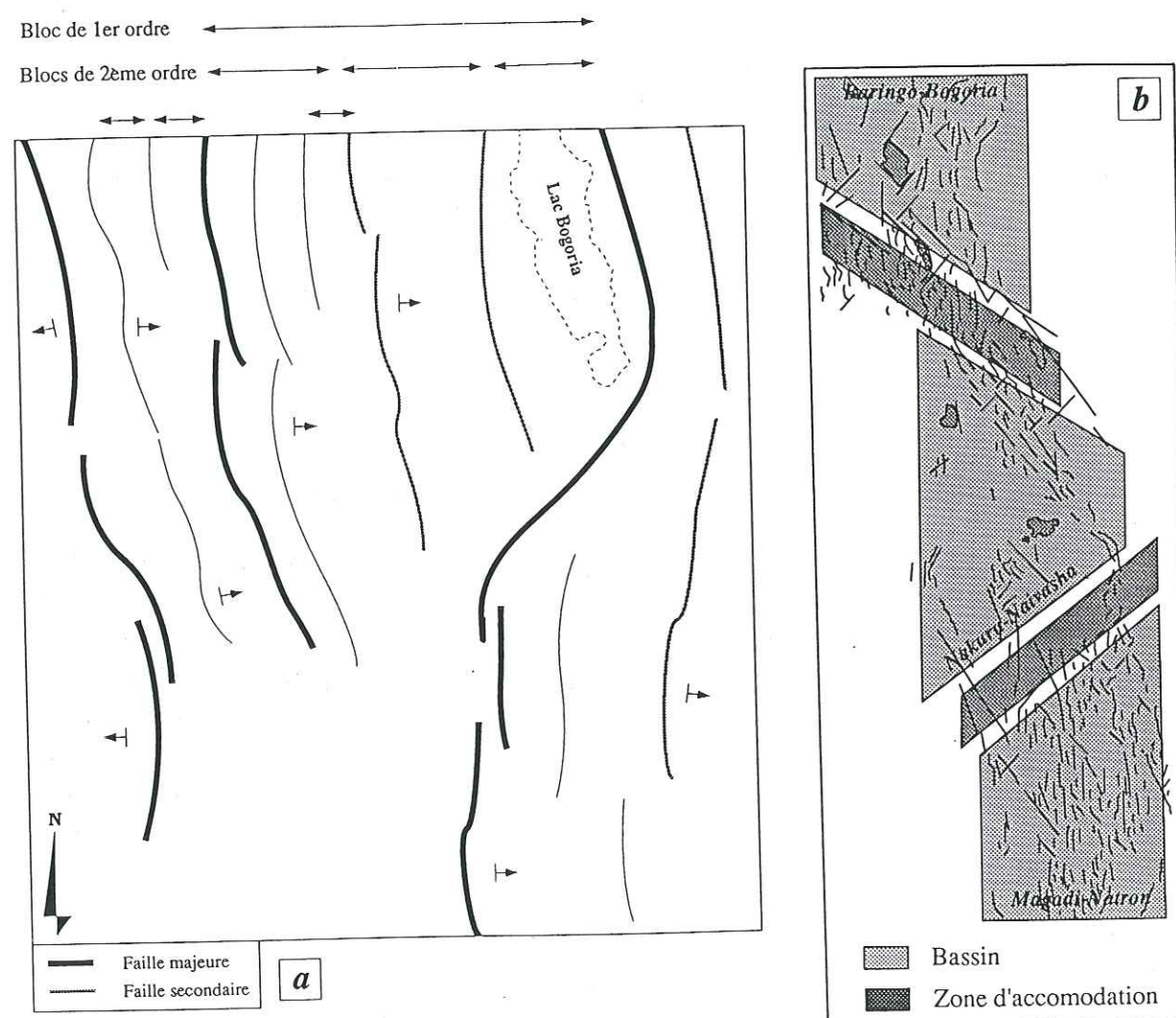


IV.3 Discussion

IV.3.1 Géométrie du Gregory Rift

Les résultats obtenus montrent tout d'abord une segmentation transversale de l'ensemble du rift, en blocs basculés de largeur variable, imbriqués les uns dans les autres (figure IV.16a). La largeur de ces blocs est définie en fonction de l'importance des failles (longueur et rejet). De plus, les failles les plus longues et à plus fort rejet sont réparties sur les bords du rift. Elles définissent les blocs basculés de premier ordre. Ceci est en accord avec les études réalisées dans ce secteur, montrant que les failles situées en bordure du rift fonctionnent en premier et possèdent les plus forts rejets [Baker et al, 1972].

Figure IV.16 a- Schéma interprétatif de la géométrie de la fracturation du Gregory Rift à partir de l'étude du secteur de Bogoria. b- Segmentation longitudinale du rift en bassins et zones d'accomodation.



A partir des images, il est également possible de distinguer trois directions de fracturation principales (N10, N60 et N140) sur le secteur du Gregory Rift. La répartition des failles varie le long du rift (failles N60 et N140 plus nombreuses dans le bassin de Nakuru-Naivasha que dans celui de Bogoria-Baringo par exemple). Ceci illustre la segmentation longitudinale du rift (figure IV.16b) et les différences structurales entre les trois bassins constituant le Gregory Rift et décrites par divers auteurs [Bosworth, 1987; Verney Green et Meyer, 1992; Smith et Mosley,

1993]. Localement, au niveau du secteur de Bogoria, les variations dans la longueur cumulée par coupe (figure IV.11) et l'évolution longitudinale des orientations (figure IV.5) confirme les différences structurales entre zone d'accommodation et bassin.

Selon ces trois orientations majeures, la distribution des longueurs de failles dans le secteur du Gregory Rift change. Ceci s'explique par l'origine héritée des structures orientées N140 et N60, mise en évidence par plusieurs études de terrain [Vidal, 1985; Bosworth, 1987; Smith et Mosley, 1993]. Les résultats concernant la mesure de la dimension fractale confirme l'importance des structures héritées sur la répartition de la fracturation dans le secteur du Gregory Rift (figure IV.15).

Enfin, la quantité d'extension, déterminée sur des coupes perpendiculaires au rift, varie peu (10 à 12%), aux fluctuations locales près, alors que la taille des failles évolue (figures IV.11 et IV.12). Ceci confirme l'importance des petites failles (courtes et nombreuses) dans l'accommodation de la déformation, comme le montrent diverses études sur la fracturation [Villemin, 1987; Walsh et al, 1991; Walsh et Watterson, 1992; Marrett et Almendinger, 1992].

Ces résultats sur la segmentation du rift indiquent qu'il existe une corrélation entre le rejet des failles et la largeur des blocs basculés qu'elles limitent. De la même façon que la largeur initiale d'un rift continental est proportionnelle à la profondeur de l'interface fragile-ductile [Allemand et Brun, 1991], la largeur des blocs peut être utilisée pour estimer la profondeur d'enracinement des failles qui les limitent [Allemand, 1988]. De plus, la forte densité de fracturation dans le Nord du secteur de Bogoria (failles courtes, nombreuses et peu espacées) par rapport au Sud de ce secteur (failles plus longues et plus espacées), est en accord avec les données sismiques situant la profondeur de l'interface socle-remplissage sédimentaire à 2 km environ près du lac Bogoria et augmentant vers le Sud [KRISP, 1991; Achauer et al, 1992].

IV.3.2 Description du réseau de failles

L'estimation du rejet sur des coupes transverses au rift est proche de l'analyse de la composante horizontale du rejet des failles, réalisée sur des profils sismiques, par Childs et co-auteurs [1990]. Elle permet de prendre en compte les variations du rejet le long des failles. Cependant, malgré l'intérêt de l'analyse simultanée des longueurs et des déplacements sur les failles [Childs et al, 1990; Scholz et Cowie, 1990; Marrett et Almendinger, 1991; Walsh et Watterson, 1992], les travaux antérieurs montrent que les relations linéaires entre déplacement et longueur sont vérifiées seulement pour certaines catégories de failles, et pour une contrainte régionale constante au cours du temps [Ranalli, 1977; Cowie et Scholz, 1992b, 1992c]. Ceci impose notamment que les structures mesurées soient reliées à une seule phase tectonique [Walsh et Watterson, 1992] ce qui n'est pas le cas dans le Gregory Rift (rôle de l'héritage et mesure de toutes les failles identifiées sur les images).

La longueur de coupure à 2,5 km (figure IV.7) qui marque un changement de lois de distribution, illustre le comportement différent des petites failles par rapport aux grandes, dans l'accommodation de la déformation [Cardon, 1992; Cowie et Scholz, 1992c]. Cette interprétation est également en accord avec celle de Krantz [1983] concernant la répartition de fractures dans un granite (pas de loi puissance particulière pour la distribution des longueurs) et celles utilisées par Nur [1982] sur des linéaments détectés sur des images Landsat (loi de distribution exponentielle). Ces résultats, comme ceux obtenus avec l'analyse fractale correspondent à une description du réseau de failles en terme de lois de distribution qui conduisent à la définition d'un modèle de croissance de failles [Sornette et Davy, 1991; Cowie et Scholz, 1992a,b,c; Davy et al, 1992; Walsh et Watterson, 1992]. Cette phase visant par exemple, l'obtention automatique d'un réseau de failles à partir de lois mathématiques n'a pas été développée au cours de ce travail.

IV.3.3 Validité des résultats

La détermination qualitative du rejet à partir des images (5 classes de rejet seulement) a pour effet de moyenniser les données, même si la simplification apportée peut aider à l'interprétation des résultats (figure IV.4). La quantité d'extension est mesurée sur des coupes perpendiculaires à la structuration majeure du rift, mais directement sur les images numériques. Ceci implique une détermination précise des failles sur ces images, de façon automatique, ce qui pose des problèmes notamment pour les failles dont l'escarpement est situé face au soleil notamment. De plus, la valeur du rejet des failles analysées ne correspond qu'à l'estimation de la composante horizontale, et le basculement des blocs de l'ordre de 20° n'est pas pris en compte. Il en est de même pour les jeux décrochants sur les failles décrits sur le terrain [Vidal, 1985; Morley et al, 1992; Rosendhal et al, 1992] et visibles sur les images (courbure en carte de certaines failles). Enfin, la largeur de l'escarpement lié à une faille dépend fortement de la lithologie des terrains fracturés, des conditions d'érosion, de l'âge de cette faille, ou de la rhéologie des matériaux. La relation entre déplacement sur la faille et largeur de la zone déformée n'est pas définie de façon claire [Scholz, 1987; Hull, 1988; Evans, 1990]. La mesure directe de cette largeur sur les images SPOT et son assimilation au rejet total de la faille constitue une approximation supplémentaire dans la mesure de l'extension.

L'utilisation des longueurs caractéristiques observées dans la distribution des failles (figure IV.8) permet d'envisager l'existence de relations entre la longueur des failles et leur profondeur d'enracinement. En terme d'énergie de fracturation, il est en effet difficile de créer une faille beaucoup plus profonde que longue [Nur, 1982]. Cependant, les relations longueur (ou largeur) des failles - profondeur d'enracinement sont complexes [Nur, 82; Faugères, 1985; Segall et Pollard, 1990] et l'utilisation des seules images satellitaires ne permet pas de les contraindre.

IV.4 Conclusions à cette étude

Les résultats précédents confirment l'existence de zones à fracturation contrastée sur le Gregory Rift, et son découpage envisagé par divers auteurs en bassins séparés par des zones d'accommodation [Bosworth, 1987; Chorowicz et al, 1987; Morley et al, 1992; Smith et Mosley, 1993]. La cohérence de ces résultats avec les données existantes (terrain ou sismique) montre l'intérêt d'une étude à partir d'images satellitaires, surtout compte-tenu de la taille du secteur analysé.

IV.4.1 Répartition de la fracturation dans le rift

Cette analyse en deux dimensions montre la répartition transversale des failles indiquant un découpage du rift en blocs basculés de largeur variable, imbriqués les uns dans les autres. Ces blocs sont limités par des failles d'autant plus longues et à fort rejet qu'elles sont espacées. La répartition longitudinale des structures révèle l'existence de zones contrastées où se développent préférentiellement certaines directions de failles. Ceci est un argument supplémentaire en faveur de la segmentation du rift en bassins successifs, mise en évidence, aussi bien sur le terrain [Baker et al, 1972; Vidal, 1985; Tiercelin et al, 1987], que par les données sismiques [Nelson et al, 1989; Henry et al, 1990; KRISP, 1991; Rosendhal et al, 1992].

Les variations dans la répartition de la fracturation, en fonction de chacune des orientations majeures des failles, confirme le rôle de la réactivation d'anciennes structures tectoniques déjà démontré dans divers segments du rift [McConnell, 1980; Castaing, 1991; Chorowicz, 1992].

Les distributions des longueurs de faille calculées, la relation rejet-longueur des failles et la dimension fractale obtenue décrivent la géométrie du réseau de failles du Gregory Rift et permettent d'envisager sa modélisation.

IV.4.2 Limites méthodologiques

Les limites méthodologiques interviennent sur trois points principaux :

- l'interprétation géologique des images satellitaires,
- la mesure des paramètres de la fracturation,
- le type de données utilisées pour caractériser cette fracturation.

L'interprétation géologique des images constitue le point de départ de tout travail de quantification. Il est très difficile de rendre cette étape totalement objective et donc d'apprécier les incertitudes de dessin ou autres lors de l'interprétation des images.

Par contre, les incertitudes de mesures des paramètres de la fracturation sont mieux contraintes. Pour les longueurs de failles, ces incertitudes sont liées à l'échelle à laquelle sont réalisées les interprétations mais également à la précision et à l'adéquation de l'appareil utilisé pour les mesurer. La méthode d'estimation du rejet des failles entraîne une incertitude importante et les résultats obtenus ne sont valables qu'en première approximation.

Ces deux dernières remarques montrent que les images satellitaires (données à deux dimensions) permettent l'obtention de bons résultats pour des analyses de répartition de la fracturation sur l'ensemble du rift, c'est-à-dire pour une analyse des failles en terme de réseau ou de population statistique. Par contre, il est évident que ces données ne suffisent pas à elles seules pour quantifier la répartition spatiale tridimensionnelle de la fracturation à partir des paramètres structuraux des failles. L'utilisation complémentaire de données sismiques ou topographiques précises est nécessaire pour accéder aux données de profondeur (forme des failles, profondeur des interfaces), ou à la description précise de la géométrie de la déformation (basculement de blocs, pendages de failles), qui permettent de reconstituer l'état ante-déformation et quantifier l'extension.

V

QUANTIFICATION DE L'EXTENSION SUR LA MARGE SUD DU YEMEN

V Quantification de l'extension sur la marge sud du Yémen

L'analyse des images satellitaires, combinée à une étude de terrain a permis d'établir la géométrie des déformations extensives de la marge sud du Yémen (chapitre 3). L'étude réalisée sur le rift Est-africain (chapitre 4) a montré que les images satellitaires seules ne suffisaient pas pour reconstituer la géométrie de l'état ante-déformation. La quantification de l'extension et des déplacements associés sur la marge sud du Yémen a donc été réalisée au moyen :

- de l'analyse des structures fragiles par télédétection,
- de données topographiques précises sous la forme de MNT couvrant les zones déformées étudiées.

La quantification de l'extension nécessite la connaissance de la géométrie de l'état déformé, fournie par l'analyse des zones déformées à un moment donné, et la connaissance d'un état de référence, état initial ante-déformation. On définit ainsi deux configurations différentes pour chaque zone étudiée :

- la configuration des blocs basculés dans l'*état final* (état actuel de la zone déformée),
- la configuration des blocs "restaurés" dans l'*état initial* (état ante-déformation de cette même zone).

La description précise de la déformation à l'aide de marqueurs géologiques permet de restaurer ceux-ci dans leur état de non-déformation. La comparaison entre état initial et état final permet alors de définir le champ de déplacements associé à cette déformation. Cette démarche est à la base de travaux concernant :

- l'analyse en carte, de zones à déformation continue [Percevault et Cobbold, 1982; Gratier et al, 1989; Guillier, 1991; Gratier et al, 1993] ou discontinue [Guillier, 1991; Rouby et al, 1993],
- l'analyse des déformations en coupes, selon le principe de l'équilibrage des structures [Hossack, 1969; Ménard, 1987; Mugnier et al, 1987; Ramsay et Huber, 1987].

La démarche utilisée ici correspond à l'application de ces techniques aux données particulières, images satellitaires et données topographiques, disponibles sur les zones déformées en contexte extensif du Sud-Yémen.

Pour ces systèmes de blocs basculés, la zone déformée se présente sous la forme de surfaces continues (planes ou flexurées) séparées par des failles dont la géométrie peut varier. A partir des seules données topographiques, il est difficile d'obtenir des informations précises sur la géométrie des failles (du fait de l'érosion par exemple). Au cours de cette étude, seules les surfaces déformées des blocs seront donc analysées, en sachant cependant que leurs limites sont conditionnées par la géométrie des failles.

Dans un premier temps, un horizon géologique suffisamment représenté sur l'ensemble de la zone déformée est défini (horizon-repère), à partir de sa signature spectrale sur les images

multibandes Landsat TM, et de son identification sur le terrain. Les images SPOT, en mode panchromatique, permettent de définir avec précision la cartographie des blocs basculés.

L'étape suivante consiste à définir le modèle de blocs basculés le plus vraisemblable, rendant compte des observations de terrain et des structures visibles sur les images. Une fois ce modèle choisi, il est construit numériquement à partir des données topographiques pour définir précisément la forme des surfaces des blocs basculés ainsi que l'altitude de l'horizon-repère. Chaque bloc basculé est ainsi modélisé par une surface plus ou moins complexe.

Chacune des surfaces qui décrivent le système de blocs basculés est restaurée dans son état initial de non-déformation. Les surfaces obtenues sont ensuite juxtaposées (ou ajustées) les unes aux autres pour former une surface unique et homogène matérialisant l'ensemble de la zone avant déformation. A ce stade, les données structurales acquises sur le terrain, ainsi que les interprétations des images SPOT et Landsat TM permettent de contraindre l'ajustement des blocs restaurés.

Après cet ajustement, la quantification de l'extension s'effectue par comparaison entre état initial (surface homogène, restaurée et ajustée) et état final (zone déformée).

La dernière étape est une approche plus cinématique (en terme de déplacements et non de déformation progressive) que géométrique qui consiste à construire le champ de déplacements finis associé à la déformation extensive, entre état ante-déformation et état actuel des zones déformées.

C'est l'ensemble de ces étapes et les conditions d'application de chacune d'entre-elles aux secteurs de blocs basculés de la marge du Sud-Yémen qui sont détaillés dans ce chapitre. Cependant, l'obtention trop tardive des données topographiques sur le secteur de Dhala n'a pas permis leur exploitation. Seuls les résultats concernant les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays sont donc présentés (figure III.8).

V.1 Géométrie de la zone déformée

V.1.1 Identification d'un horizon-repère

La couche géologique considérée comme repère, doit être représentée sur l'ensemble de la zone déformée pour permettre une analyse sur un nombre important de blocs. Le choix de cet horizon-repère se fait à la fois sur le terrain et à partir des images multispectrales (figure V.1a,b). L'image présentée est une composition colorée construite à partir de l'utilisation de classifications hiérarchisées différenciant les lithologies, d'un filtre médian sur le canal TM4 et d'un filtre passe-haut sur le canal TM7. L'ensemble de l'image a ensuite subi un réhaussement des contrastes.

Dans le cas du secteur de Umm Shatt, l'horizon-repère est un horizon trachytique situé dans la partie supérieure des termes acides de la série des trapps du Yémen, qui affleure sur l'ensemble de la zone déformée. Cet horizon est nettement marqué dans tous les escarpements à l'amont des blocs basculés (figure V.1c). Il affleure rarement au dos des blocs compte-tenu de sa position dans la colonne stratigraphique. L'analyse sur le terrain n'a pas révélé de variations d'épaisseur pour cet horizon volcanique, et ceci sur l'ensemble de la zone considérée. C'est le toit de cet horizon qui est utilisé au cours des étapes suivantes comme marqueur géologique représentatif de chaque bloc basculé.

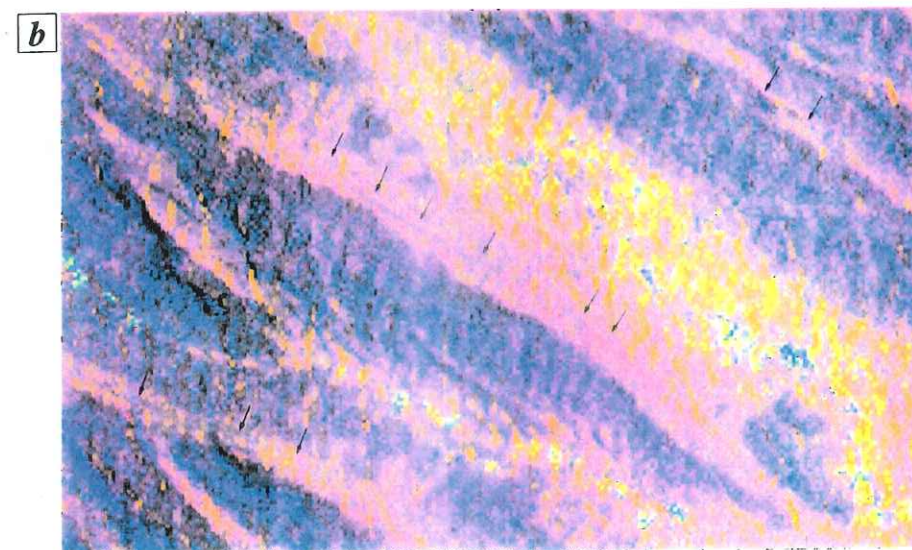
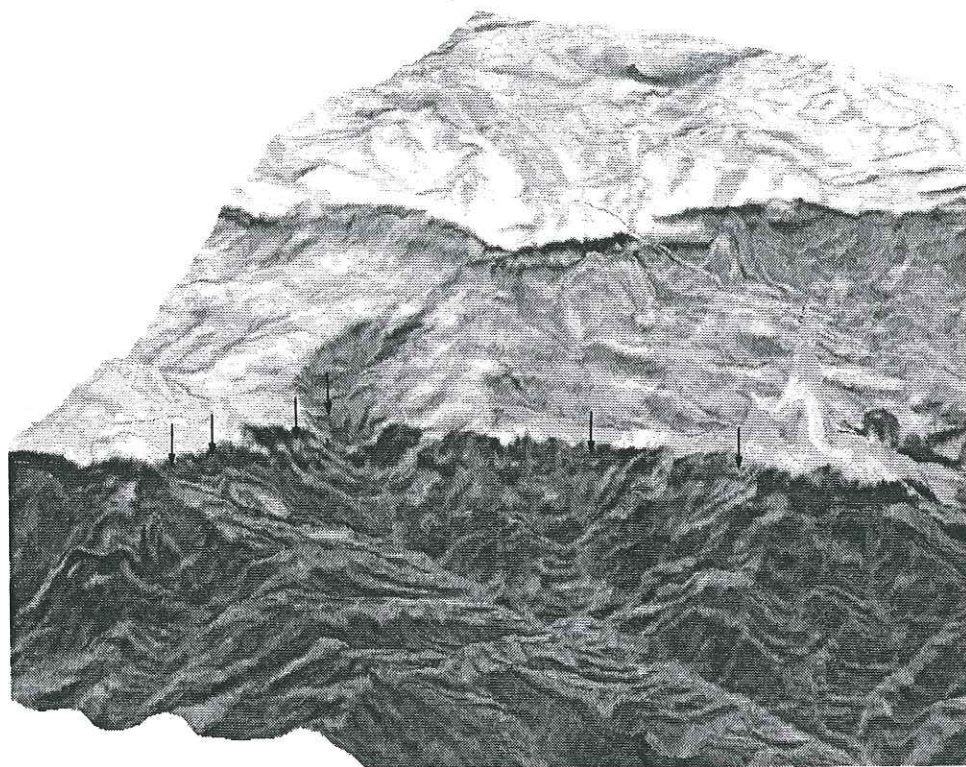


Figure V.1 a- Extrait de la scène Landsat TM 166-51 couvrant l'ensemble de la zone déformée analysée dans le secteur d'Umm Shatt. Le cadre correspond au secteur présenté en b; b- Identification d'un horizon-repère en amont d'un bloc basculé (flèches), par sa signature spectrale sur les images multibandes Landsat TM; c- Identification de l'horizon-repère sur le terrain (flèches), dans l'escarpement de faille en amont du même bloc basculé.

Dans le secteur de Ba'tays, le choix de l'horizon-repère est plus délicat. En effet, si les séries sédimentaires se différencient très bien sur les images multispectrales et par une analyse morphologique sur les vues perspectives (figure V.2), l'analyse de terrain a mis en évidence l'existence d'un niveau de décollement dans la série sédimentaire (marnes et gypse du Kimméridgien).

Ce décollement se marque dans la série Tithonique par la formation de failles inverses N70 et de failles décrochantes N120 qui accommodent localement la déformation liée au glissement des séries sur le niveau de décollement. Ces failles n'ont ainsi pas la même signification que celles qui séparent les blocs basculés. Pour s'affranchir de ces problèmes, l'horizon géologique choisi est situé dans les séries du Jurassique inférieur. Il s'agit d'une couche calcaire d'une dizaine de mètres d'épaisseur bien représentée sur l'ensemble de la zone déformée. La figure V.2 illustre le repérage de cet horizon géologique à partir d'une vue perspective du secteur.

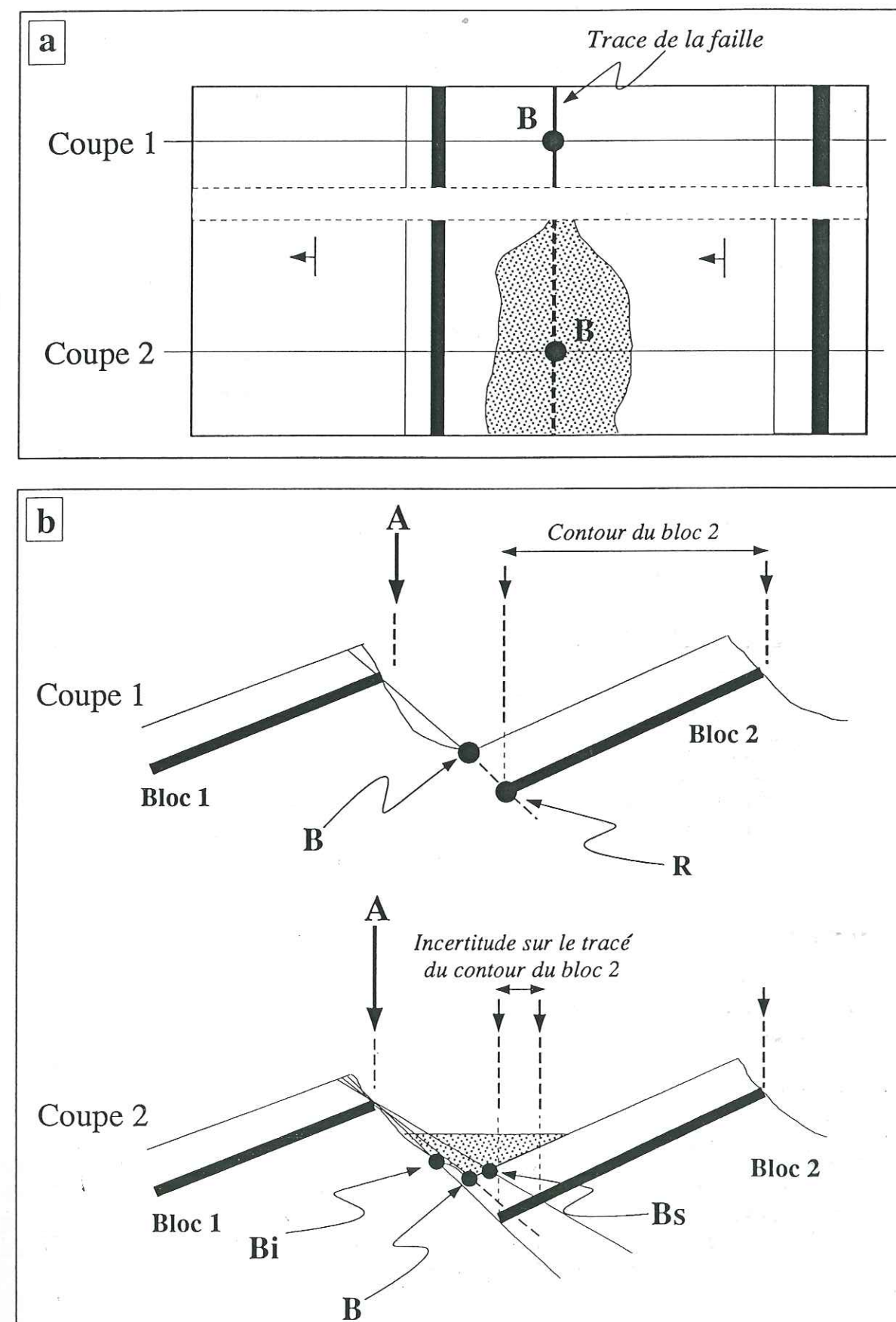
Figure V.2 Identification de l'horizon-repère (flèches) dans les séries du Jurassique sur une vue perspective du secteur de Ba'tays.



V.1.2 Cartographie de la géométrie des blocs

Le contour de chaque bloc basculé est tracé directement sur l'ortho-image correspondant au MNT. Les ortho-images sont calculées à partir des scènes SPOT panchromatiques (chapitre 2) et possèdent une résolution au sol de 10 mètres. Le tracé du contour des blocs différencie sur les images, les zones occupées par les blocs basculés de celles occupées par les failles. Il correspond à la projection du contour des blocs identifiés sur un plan horizontal et permet de déterminer les coordonnées XY des points qui composent ce contour. Le dessin des contours est aisé dans la zone située à l'amont du bloc, au niveau de l'escarpement de faille. L'horizon-repère choisi ressort nettement dans la falaise (morphologie, signature spectrale). Aux erreurs liées à l'érosion près, le tracé du contour du bloc suit celui de l'horizon-repère (point A sur la figure V.3). Par contre, la limite arrière du bloc est plus difficile à définir, compte-tenu du manque d'information sur la géométrie de la faille.

Figure V.3 Incertitudes liées au tracé du contour des blocs basculés sur les images.
a- Image en carte de blocs basculés; b- Visualisation de ces blocs en coupe.



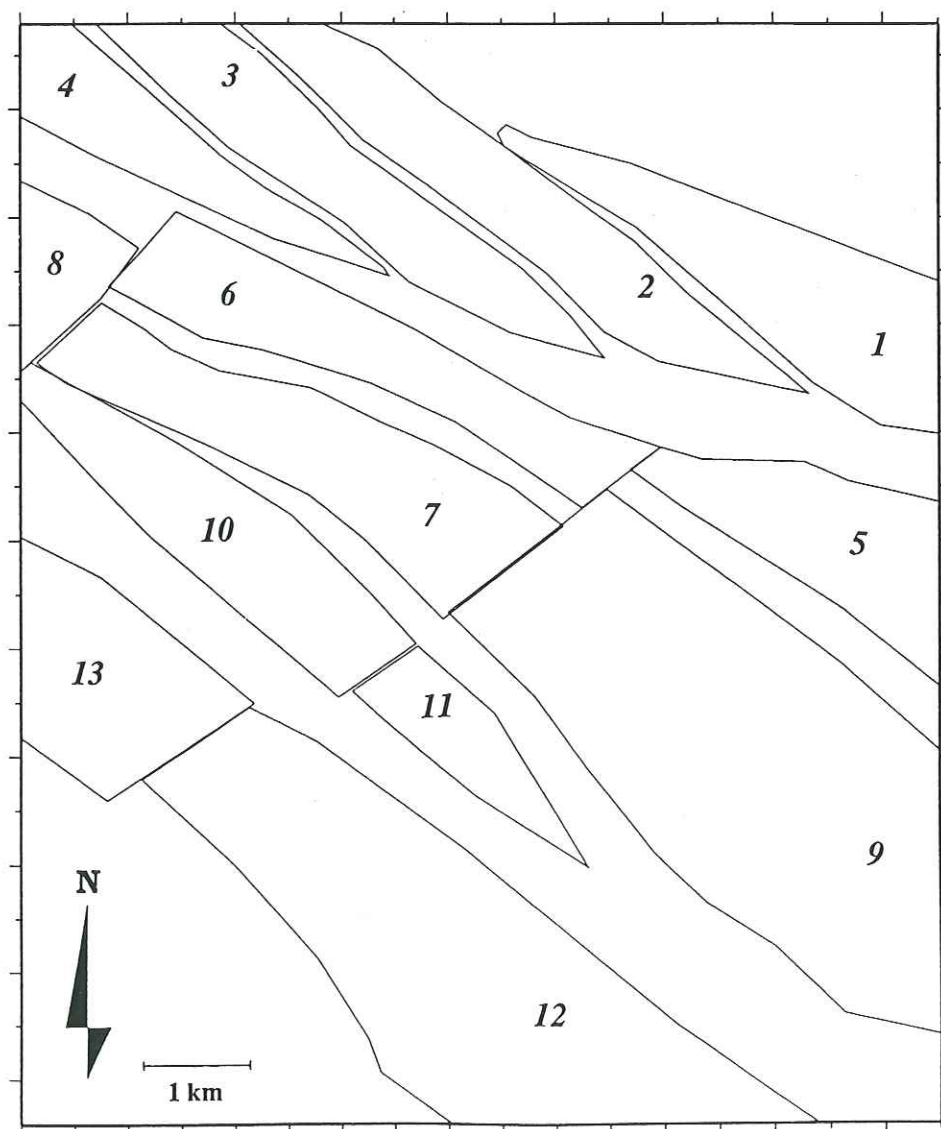
Dans un premier temps, il faut déterminer avec précision, la position de la faille séparant deux blocs sur les images (point B sur la figure V.3a). En coupe, ceci revient à considérer que la faille correspond à une ligne joignant les points A et B (coupe 1 sur la figure V.3b).

Dans le cas d'un remplissage sédimentaire en fond de vallée (figure V.3a et coupe 2 sur la figure V.3b), il existe une incertitude sur la position du point B (points Bi et Bs). Cette incertitude implique en coupe une variation de la longueur du bloc (bloc 2 sur la figure V.3b) corrélée à une variation du pendage de la faille tracée entre les points A et B, Bi ou Bs.

Ensuite, pour tracer le contour du bloc correspondant à l'horizon-repère choisi, il est nécessaire de déterminer la position XY du point R (coupe 1 sur la figure V.3b) qui est la projection de l'intersection entre la faille et l'horizon-repère (point S). Pour chaque position du point B, le point R est toujours situé plus en amont. Sa position dépend du basculement des blocs, de la géométrie de la faille et de la position de l'horizon-repère dans la colonne stratigraphique. A partir des données topographiques et des images, il est difficile d'avoir accès à ces informations (figure V.3). Ceci montre bien les difficultés rencontrées lors de l'interprétation des images, pour apprécier l'erreur commise lors du tracé du contour au dos des blocs.

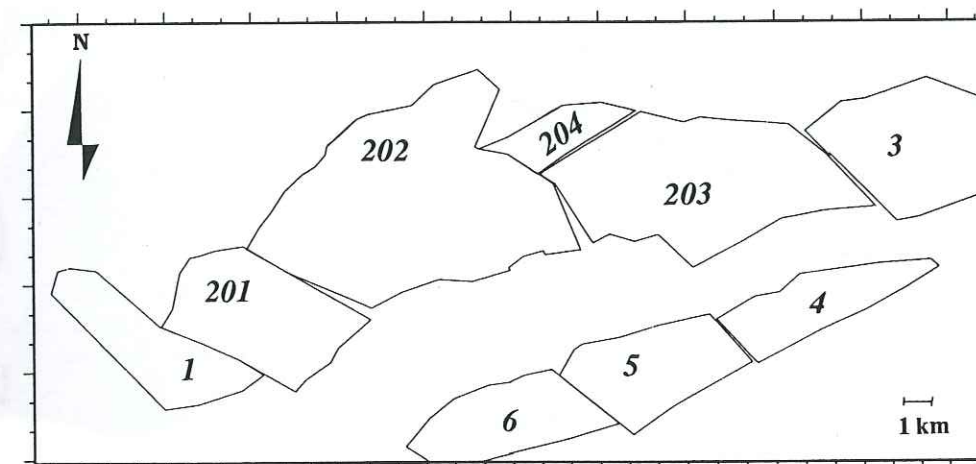
Les coordonnées XY des points du contours des blocs étant déterminées directement sur l'ortho-image, les contours des blocs sont repérés dans la géométrie du MNT. La figure V.4 illustre un tracé réalisé sur le secteur de Umm Shatt.

Figure V.4 Contours des blocs basculés définis à partir du couple d'images SPOT 146-324 focalisé sur le secteur de Umm Shatt.



Pour le secteur de Ba'tays, le dessin des contours répond aux mêmes règles. Le tracé de l'horizon repéré dans le Jurassique inférieur, est facile à l'amont des blocs basculés. Cependant, cet horizon se trouve assez bas dans la série sédimentaire. Sa position précise à l'arrière de chaque bloc est fonction de la géométrie de la faille et du pendage des blocs. Ceci constitue une incertitude supplémentaire lors de la définition des contours de chaque bloc et atteste de la difficulté de les dessiner en toute objectivité. L'incertitude sur la position du contour du bloc à cet endroit est d'autant plus grande que les séries sédimentaires jurassiques sont décollées (chapitre 3). La figure V.5 illustre la réalisation d'un dessin du contour des blocs réalisé à partir de l'ortho-image couvrant ce secteur.

Figure V.5 Contours des blocs basculés définis à partir du couple d'images SPOT 149-323, sur le secteur de Ba'tays.



V.1.3 Mesure de l'orientation des blocs basculés

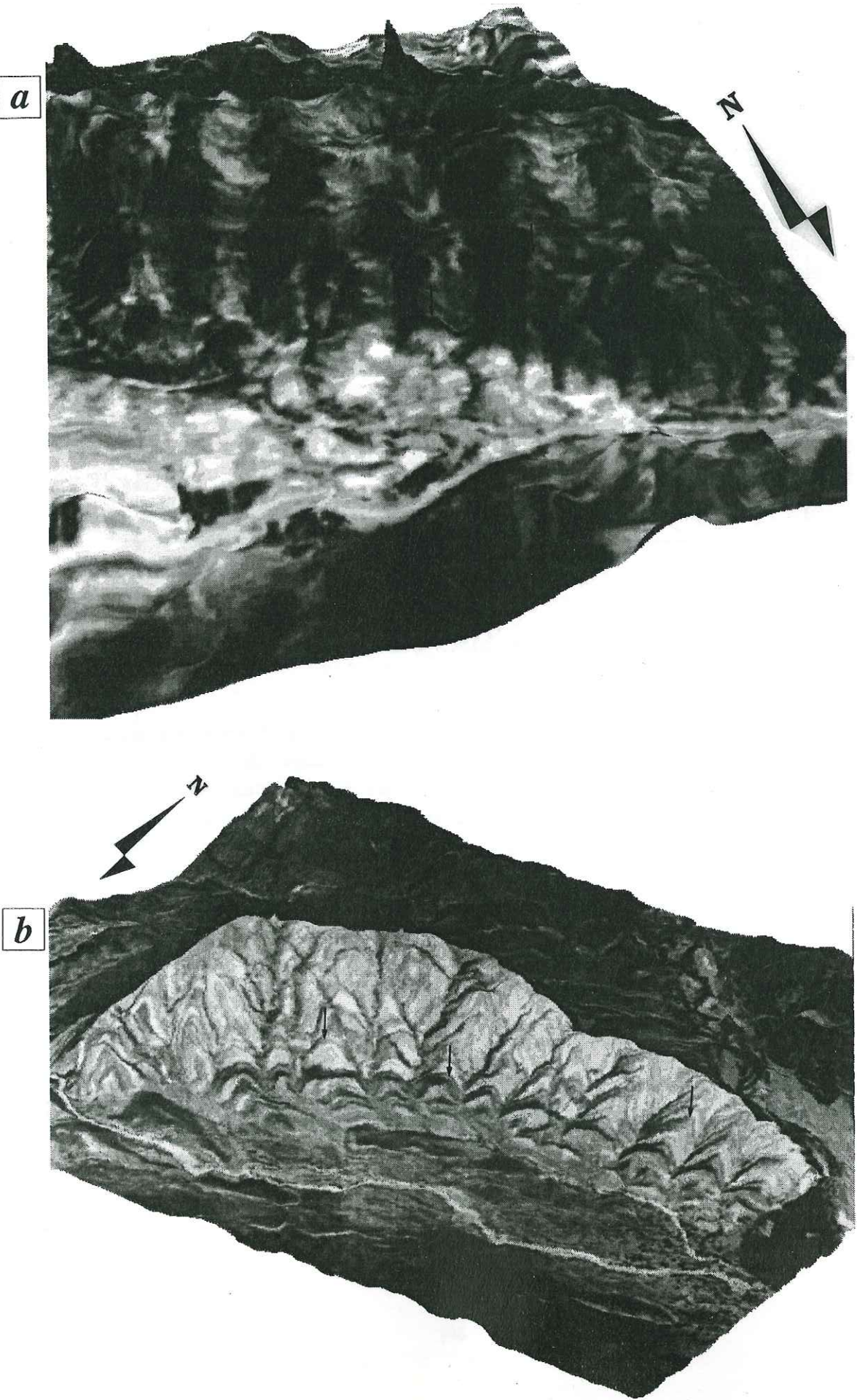
1.3.1 Principe

A partir des données topographiques, il est plus simple de caractériser le pendage et l'azimut des surfaces représentant les blocs basculés, plutôt que d'essayer de décrire la géométrie des failles. En effet, l'analyse des images révèle l'existence de nombreux indicateurs de pendage, au dos des blocs basculés. Ces indicateurs sont d'autant mieux exprimés que, dans les régions concernées, la végétation est peu abondante et que les conditions d'affleurement sont exceptionnelles. Le repérage de ces indicateurs est aisé, sur les images comme sur les vues perspectives (figure V.6).

A partir du logiciel XVUE3D manipulant des vues perspectives (chapitre 2), il est possible de mesurer directement les caractéristiques structurales (pendage, azimut) de marqueurs géologiques. Cependant, ces "potentialités" du logiciel montrent deux limites importantes :

- la méthode de calcul du pendage et de la direction du marqueur géologique n'est pas clairement explicitée,
- l'identification de ce marqueur se fait sur l'ortho-image, et non sur la vue perspective. Ceci ne permet pas de s'affranchir d'erreurs résiduelles du MNT et enlève de la précision dans la détermination du marqueur géologique. L'identification d'un marqueur sur une vue perspective est beaucoup plus précise si l'utilisateur peut choisir l'angle de vision, ce qui n'est pas le cas avec une mesure directe en deux dimensions sur l'ortho-image.

Figure V.6 Visualisation des indicateurs de pendage sur une vue perspective. Quelques-uns des indicateurs sont soulignés par des flèches. a- secteur de Umm Shatt, b- secteur de Ba'tays.



Pour ces raisons, la détermination de l'orientation des blocs basculés a été réalisée de la façon suivante :

- mesure des coordonnées de chaque point des marqueurs géologiques, dans un repère XYZ, directement sur les vues perspectives,
- détermination du pendage et de l'azimut associés à ces marqueurs, par un calcul de régression plane sur les points mesurés.

1.3.2 Repérage des marqueurs géologiques sur les MNT

La mesure des marqueurs géologiques, indicateurs de pendage, à partir des vues perspectives, dépend de la précision du MNT utilisé, donc de la qualité des images SPOT (chapitre 2). Le tableau V.7 permet de comparer les caractéristiques des images utilisées pour le calcul des MNT.

Tableau V.7 Caractéristiques des images utilisées pour le calcul des MNT dans les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays.

Secteur d'Umm Shatt		Secteur de Ba'tays		
Image gauche	Image droite	Image gauche	Image droite	
146-324		149-323		N° de scène
19-05-1988	02-12-1988	31-07-1987	03-12-1990	Date PV
18,7 W	1,3 E	vertical	17,8 E	Angle PV
Carte de navigation aérienne TCP-UK4		Fond topographique (1978)		Carte topographique utilisée pour le recalage
1/500 000		1/100 000		Echelle de la carte
0,387		0,383		Rapport b/h
10 m		10 m		Précision en Z du MNT

Compte-tenu de l'échelle des cartes utilisées pour le calage en altitude des points calculés, les MNT ont une précision bien meilleure en altitude relative qu'en altitude absolue. Pour l'utilisation du MNT qui est faite au cours de travail (mesures locales des coordonnées XYZ de marqueurs géologiques), ce petit défaut importe peu, puisque seule la précision relative entre en compte.

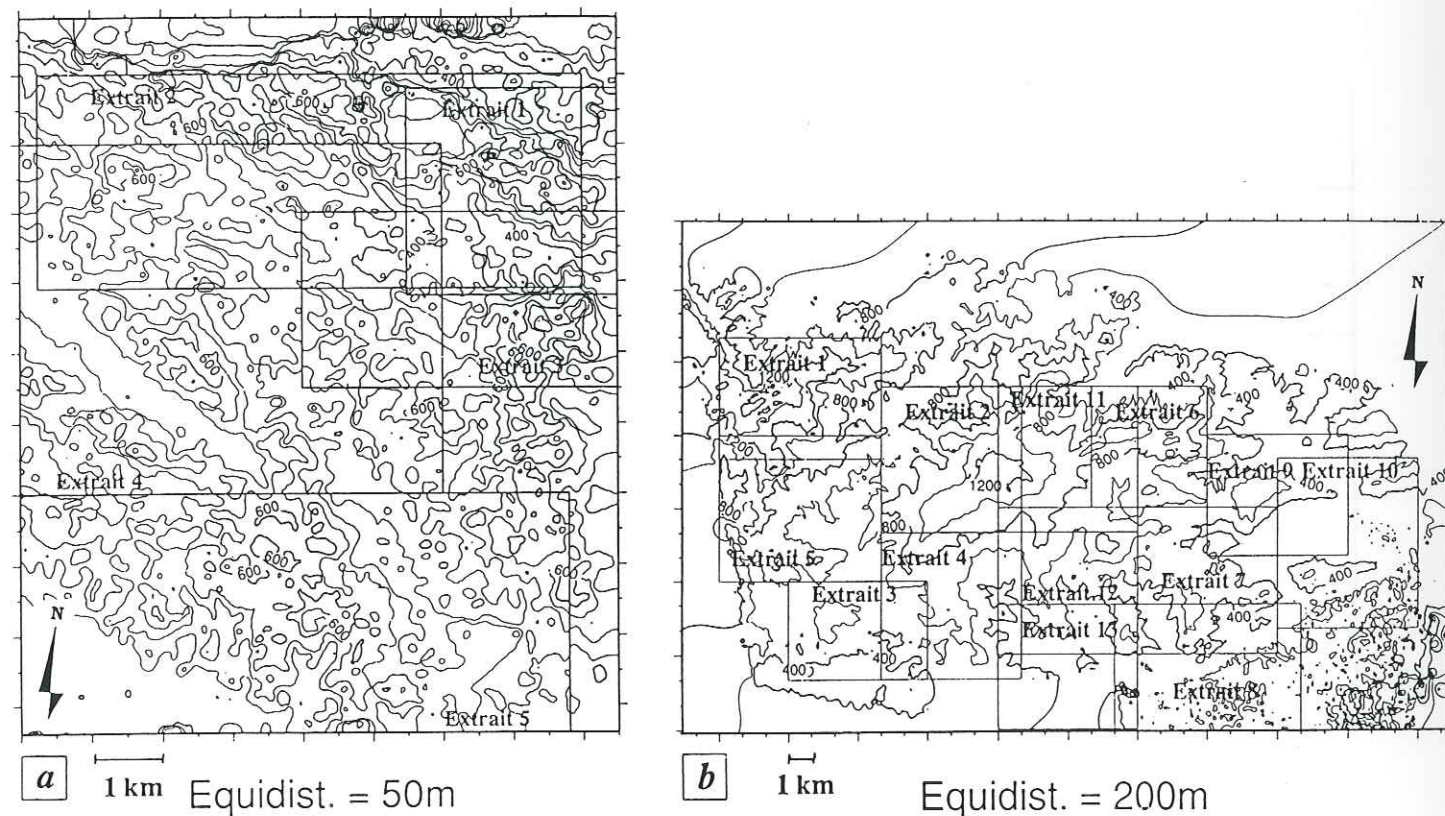
Dans le secteur de Umm Shatt, le MNT utilisé couvre une surface de 8,5 km par 10,5 km environ (figure III.11). Les mesures sont réalisées sur un MNT calculé au pas de 20 m en XY (Annexe 3).

Dans le secteur de Ba'tays, le MNT utilisé (figure III.18) correspond à la juxtaposition de plusieurs MNT (chapitre 2) et couvre une surface de 32 km par 21 km (Annexe 3). Comme pour le secteur de Umm Shatt, le pas du MNT en XY est de 20 m. Le MNT de Ba'tays, présente des erreurs résiduelles dans le coin Sud-Est. Ces erreurs sont liées au calcul de l'autocorrélation numérique, dans une zone de sable et de champs parcellaires. L'écart en temps important entre les deux images utilisées pour le calcul (plus de trois ans), ainsi que la répétitivité des motifs (champs réguliers), entraînent un mauvais appariement des primitives entre les deux images, et

expliquent ces erreurs. Cette partie du MNT ne couvre pas une zone importante sur le plan géologique, et ne sera pas utilisée par la suite.

Enfin, il faut noter que le logiciel XVUE3D ne peut visualiser des vues perspectives en pleine résolution que si leur taille ne dépasse pas 800 pixels de côté. Des vues perspectives de taille supérieure sont visualisées après un sous-échantillonnage. Les mesures réalisées sur ces vues ne sont alors plus significatives. Pour éviter le préjudice du sous-échantillonnage sur la précision des mesures, des extraits de taille inférieure à 800 x 800 pixels, sont construits dans les deux secteurs étudiés (figure V.8).

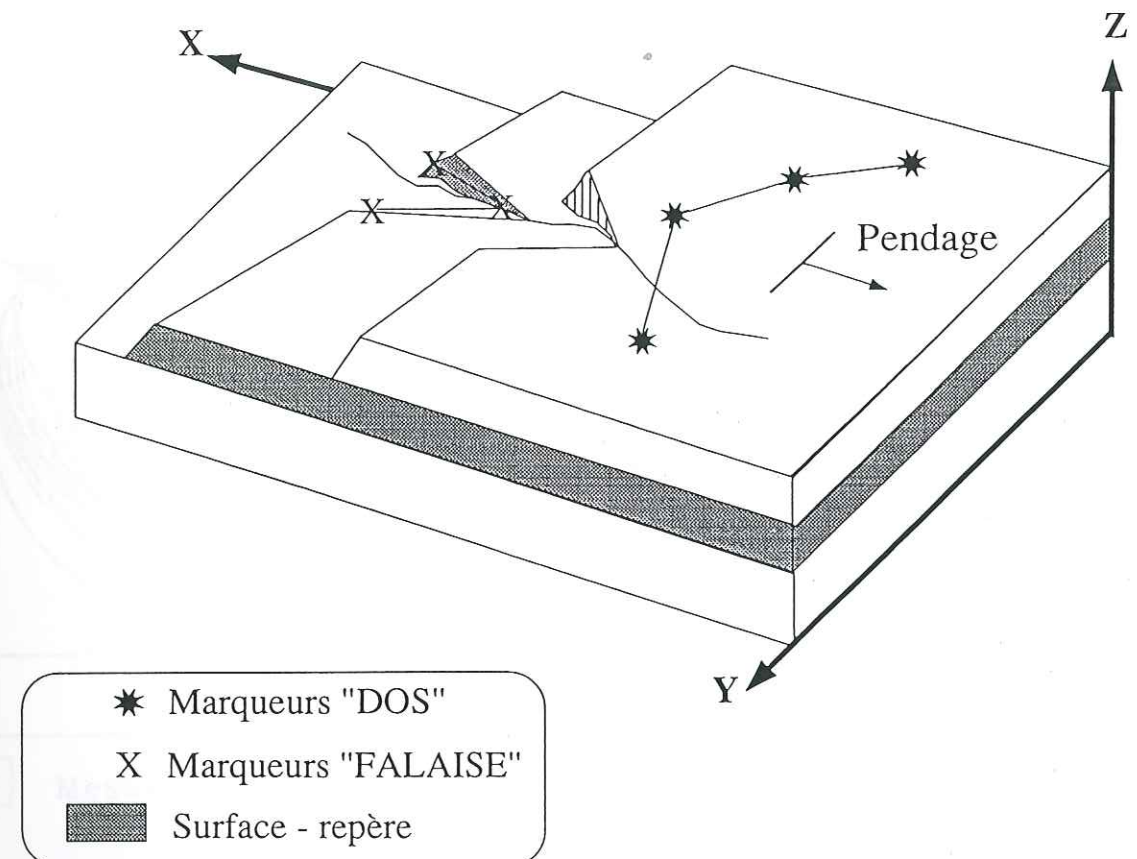
Figure V.8 Localisation des extraits réalisés sur les MNT : a- Secteur de Umm Shatt, b- Secteur de Ba'tays.



Sur les vues perspectives de ces extraits, les indicateurs de pendage sont mesurés directement par repérage des coordonnées de points constitutifs dans le repère XYZ du MNT. De la même façon, les coordonnées de points correspondant aux horizons-repère sont déterminés, pour connaître leur altitude, ainsi que leur position en XY par rapport aux contours des blocs. Ces mesures conduisent à définir deux types de marqueurs géologiques différents (figure V.9) :

- des marqueurs "DOS" situés au dos des blocs basculés et correspondant à des indicateurs de pendage des surfaces géologiques exposées,
- des marqueurs "FALAISE" situés à l'amont de chaque bloc basculé et correspondant à la mesure des horizons géologiques choisis comme horizon-repère.

Figure V.9 Principe de mesure des marqueurs géologiques sur les vues perspectives. Les coordonnées des points qui constituent le marqueur "dos" (étoiles) ou le marqueur "falaise" (croix) sont mesurées dans le repère XYZ.



1.3.3 Calcul de l'orientation des marqueurs

Lorsqu'on réalise une mesure de pendage sur le terrain, la boussole est posée sur une surface considérée localement comme plane. De la même façon, l'hypothèse réalisée pour le calcul de l'orientation des marqueurs géologiques considère que les points d'un même marqueur appartiennent tous à un même plan.

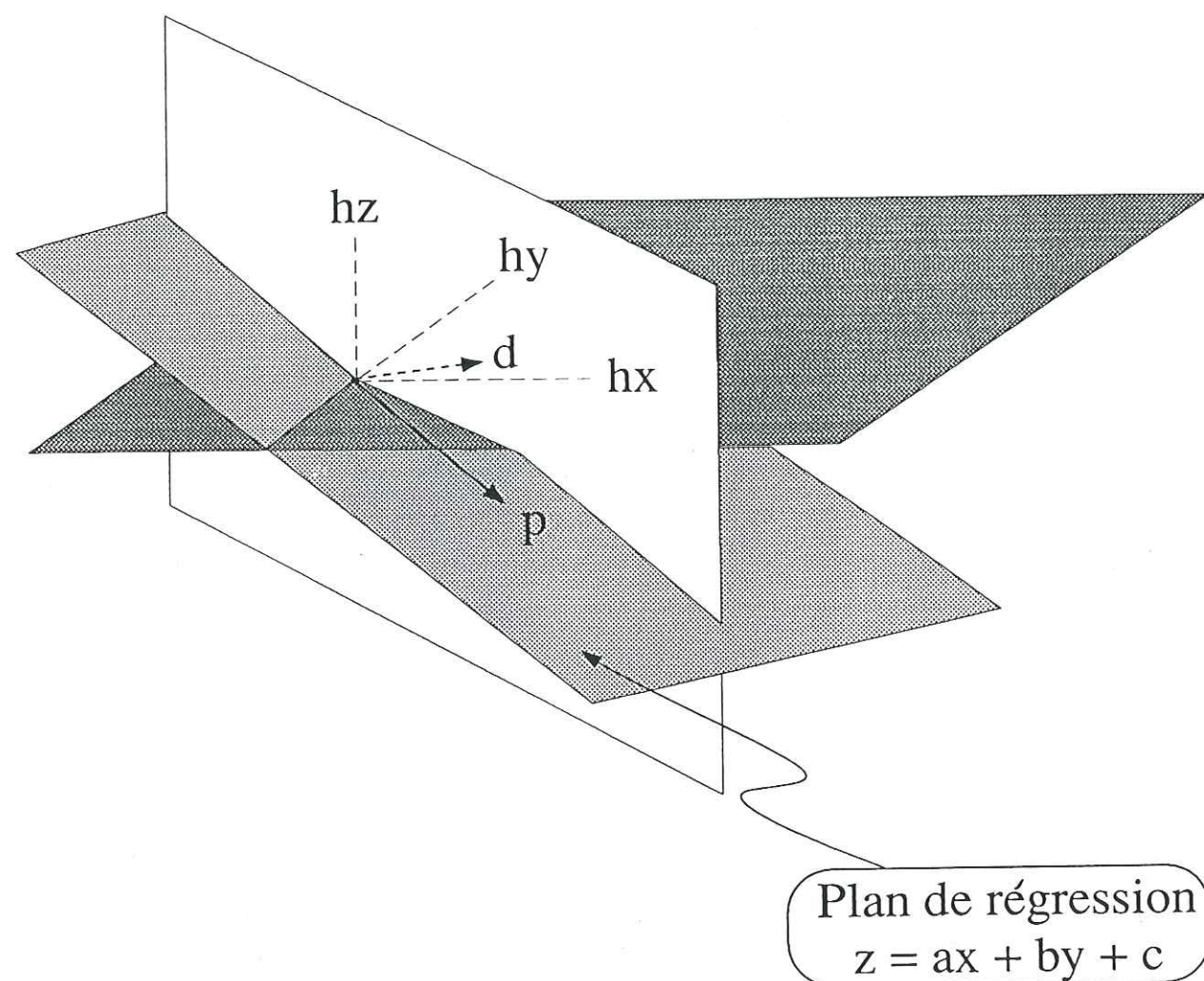
L'équation du plan passant par les différents points du marqueur est calculée par le programme *regplanf.c* qui fournit également les paramètres statistiques associés (moyenne, écart-type, erreur d'estimation ...) permettant de tester la validité des résultats. Il est évident que le calcul sera meilleur :

- si tous les points mesurés appartiennent bien au même marqueur,
- si la répartition spatiale de tous les points du marqueur est assez large, et non-linéaire,
- si le nombre de points pour la régression est suffisant (au moins égal à 3).

Ce calcul de régression est réalisé essentiellement pour les marqueurs "dos". Les marqueurs "falaise" ont une répartition spatiale plutôt linéaire et ne sont utilisés que dans quelques cas particuliers (V de l'horizon-repère dans une combe par exemple).

Après ce calcul, le pendage et l'azimut de chacun des marqueurs sont déterminés à l'aide de l'équation du plan de régression d'après la construction géométrique suivante (figure V.10).

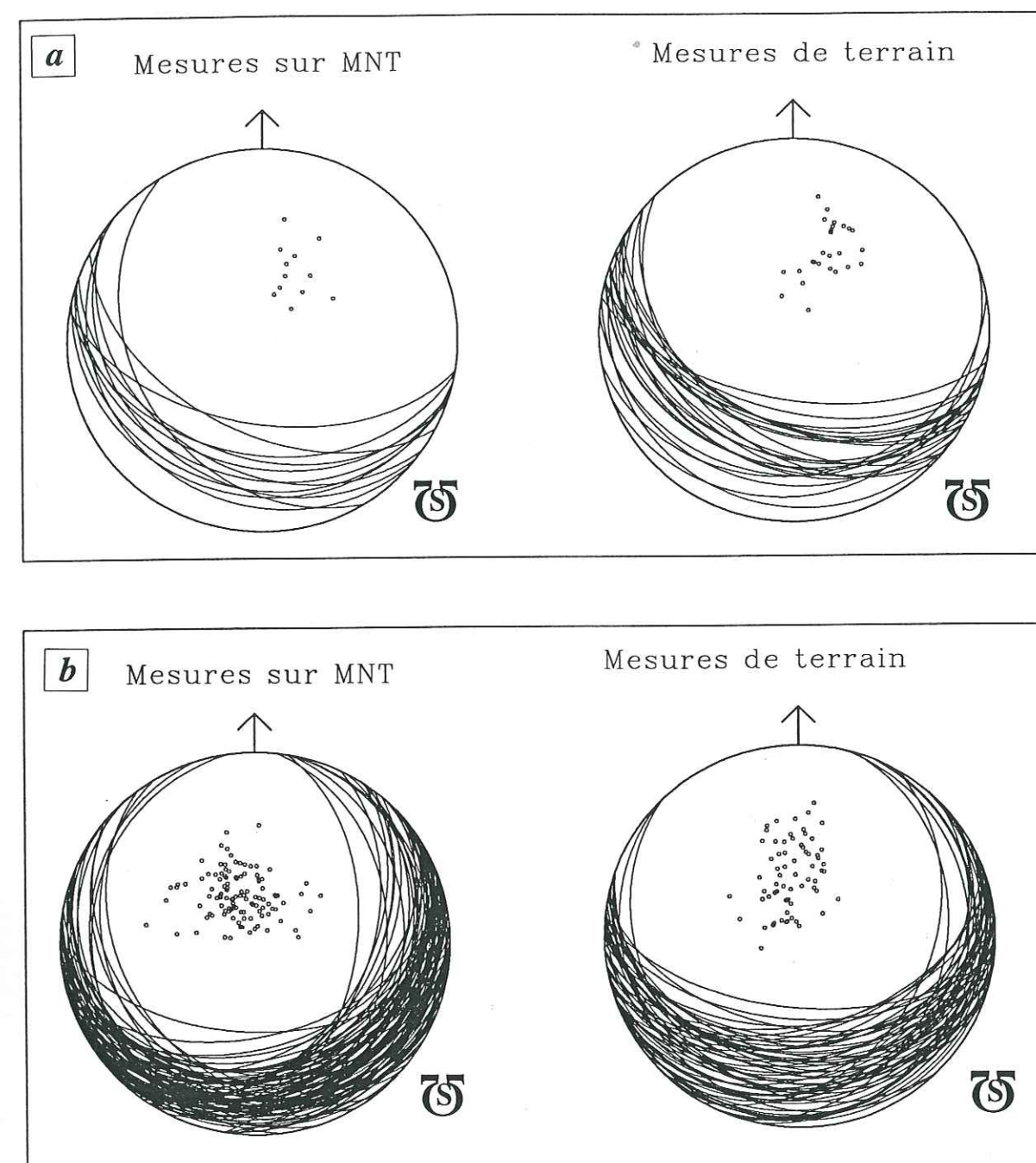
Figure V.10 Principe géométrique de détermination de l'orientation des marqueurs géologiques, à partir des coefficients de l'équation du plan qui les caractérisent. L'axe hy correspond au Nord géographique, d à la direction et p au pendage du plan.



Le programme *caraplan.c* réalise cette transformation géométrique à partir des coefficients du plan de régression et fournit un fichier contenant direction et pendage du plan mesuré, ainsi qu'un fichier au format du logiciel VPLOT permettant de visualiser directement les mesures obtenues sur un stéréogramme.

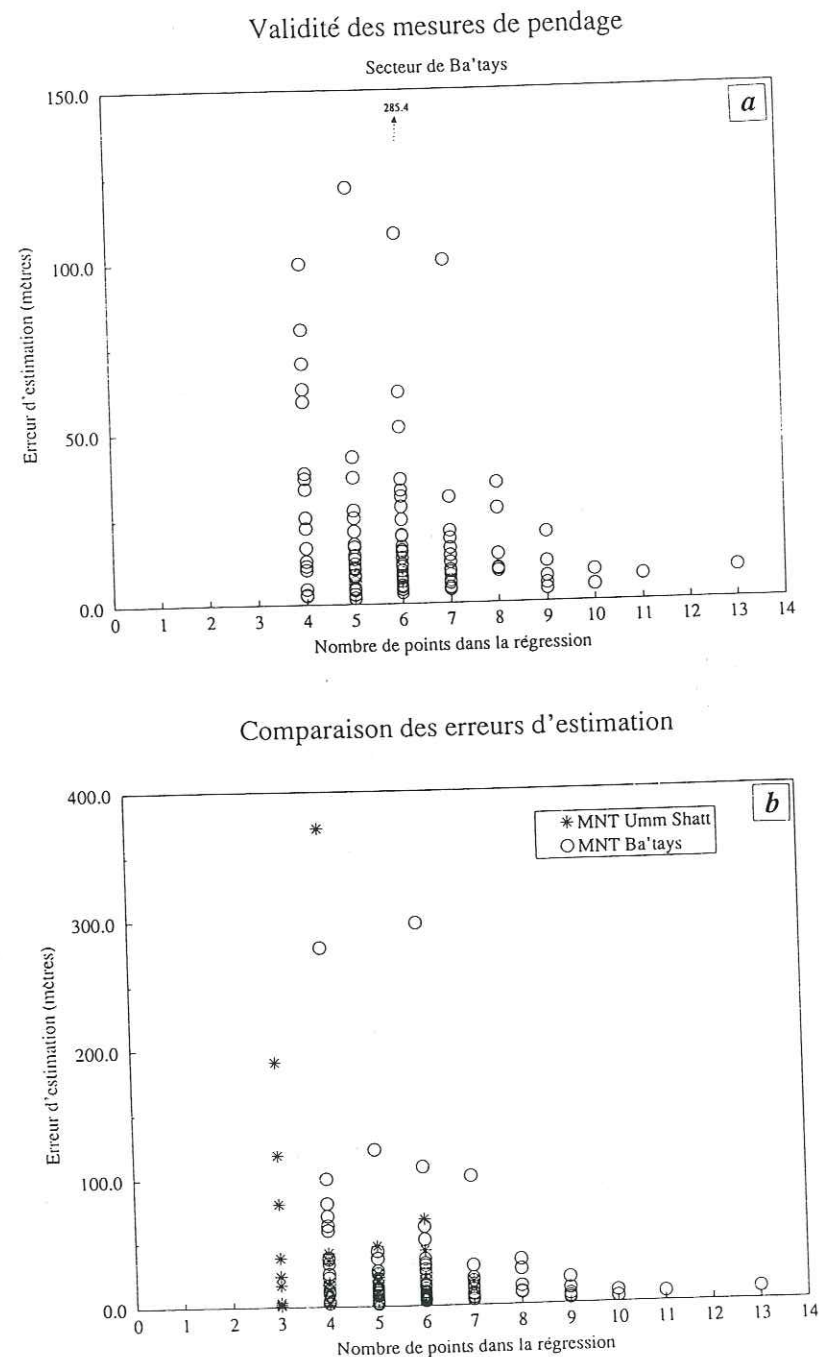
La validité des pendages obtenus est alors analysée. Des comparaisons réalisées entre la mesure du pendage d'un même marqueur géologique effectuée, (i) avec XVUE3D, (ii) par la méthode de mesure présentée ici et (iii) sur le terrain, montrent un écart angulaire dans le pendage de plus de 20° et des écarts angulaires dans les directions assez aberrants entre les mesures de terrain et celles obtenues avec XVUE3D. Par contre, toutes les orientations obtenues avec la méthode développée précédemment ne montrent pas d'écart particulier, en pendage ou en direction, avec les données de terrain (figure V.11), ou même avec l'analyse "à l'oeil" des vues perspectives (sens des indicateurs de pendage par exemple) (figure V.6). Ces résultats attestent de la validité de la méthode développée et de la mesure des coordonnées XYZ des points du marqueur directement sur les vues perspectives et non sur l'ortho-image.

Figure V.11 Comparaison de l'orientation des plans mesurés sur les vues perspectives et sur le terrain. a- Secteur de Umm Shatt, b- Secteur de Ba'tays



Une analyse statistique détaillée de chacune des orientations obtenues permet de définir les limites de validité de ces résultats. Dans un premier temps, le calcul de la régression plane est vérifié en recalculant la nouvelle altitude donnée par l'équation du plan, pour chacune des coordonnées XY des points du marqueur. La comparaison de cette valeur avec l'altitude mesurée sur les vues perspectives fournit l'erreur d'estimation. Les marqueurs mesurés présentant une erreur d'estimation supérieure à 30 m ont été systématiquement éliminés. L'analyse de l'influence du nombre de points utilisés dans le calcul de la régression sur l'erreur d'estimation obtenue (figure V.12a) montre que cette erreur diminue si le nombre de points augmente.

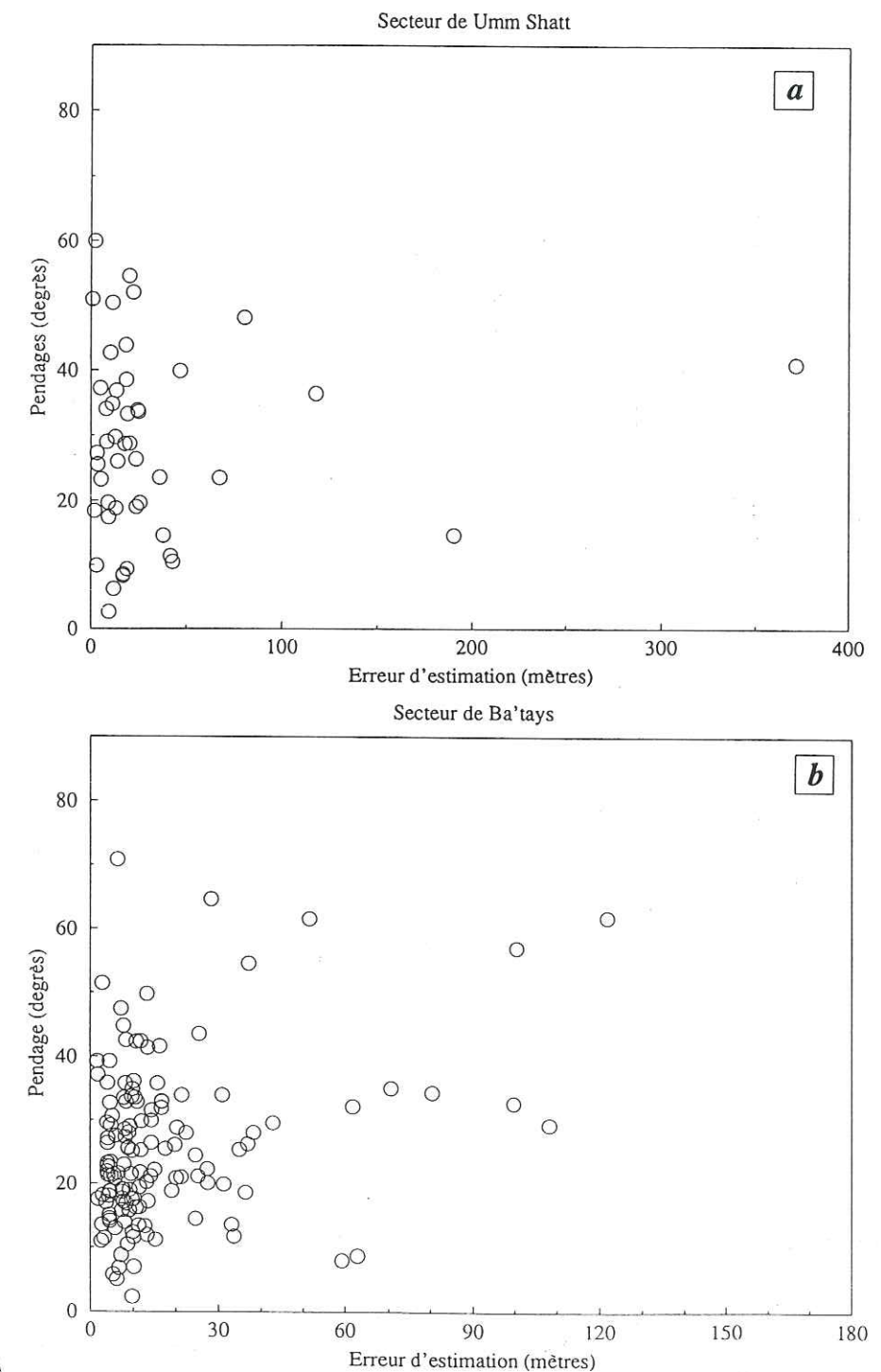
Figure V.12 Diagramme du nombre de points utilisés pour la régression plane en fonction de l'erreur d'estimation. a- secteur de Ba'tays, b- comparaison des deux secteurs.



Cependant, certains marqueurs définis par peu de points (3 ou 4) possèdent des erreurs d'estimation faibles. Ceci permet de penser qu'une forte erreur d'estimation est associée à une mauvaise définition des marqueurs sur les vues perspectives plutôt qu'au faible nombre de points utilisés pour la régression. Ceci est valable pour les mesures réalisées dans les deux secteurs, Umm Shatt ou Ba'tays (figure V.12b). L'erreur d'estimation moyenne est un peu plus élevée dans le secteur de Umm Shatt, ce qui s'explique d'une part par l'amélioration du calcul du MNT réalisé pour le secteur de Ba'tays [Mémier, communication personnelle] et d'autre part, par le fait que les surfaces structurales sont mieux définies dans ce secteur par rapport à celui de Umm Shatt (figure V.6).

L'analyse des pentages obtenus en fonction de l'erreur d'estimation ne montre pas de corrélation particulière entre ces deux valeurs (figure V.13).

Figure V.13 Diagramme de l'erreur d'estimation lors de la régression plane, calculée sur les coordonnées des marqueurs, en fonction du pendage obtenu. a- Secteur de Umm Shatt; b- Secteur de Ba'tays.

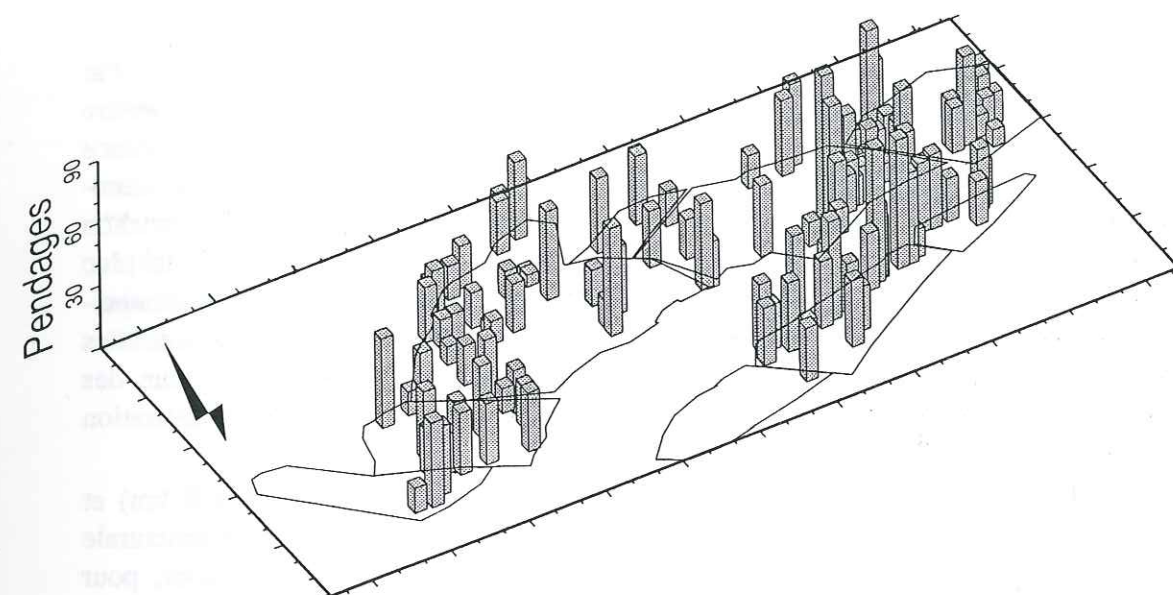


Ceci constitue un argument supplémentaire montrant la nécessité d'une grande précision de mesure sur les vues perspectives, par rapport aux erreurs introduites par les divers calculs (programmes *regplanf.c* et *caraplan.c*). Ce graphique permet en plus de visualiser les pendages les plus représentés sur chacun des secteurs. Dans le secteur d'Umm Shatt, le pendage moyen des blocs est de l'ordre de 25° , alors que dans le secteur de Ba'tays, ce pendage moyen est un peu plus élevé (35° environ). Ceci correspond parfaitement aux observations structurales effectuées sur le terrain.

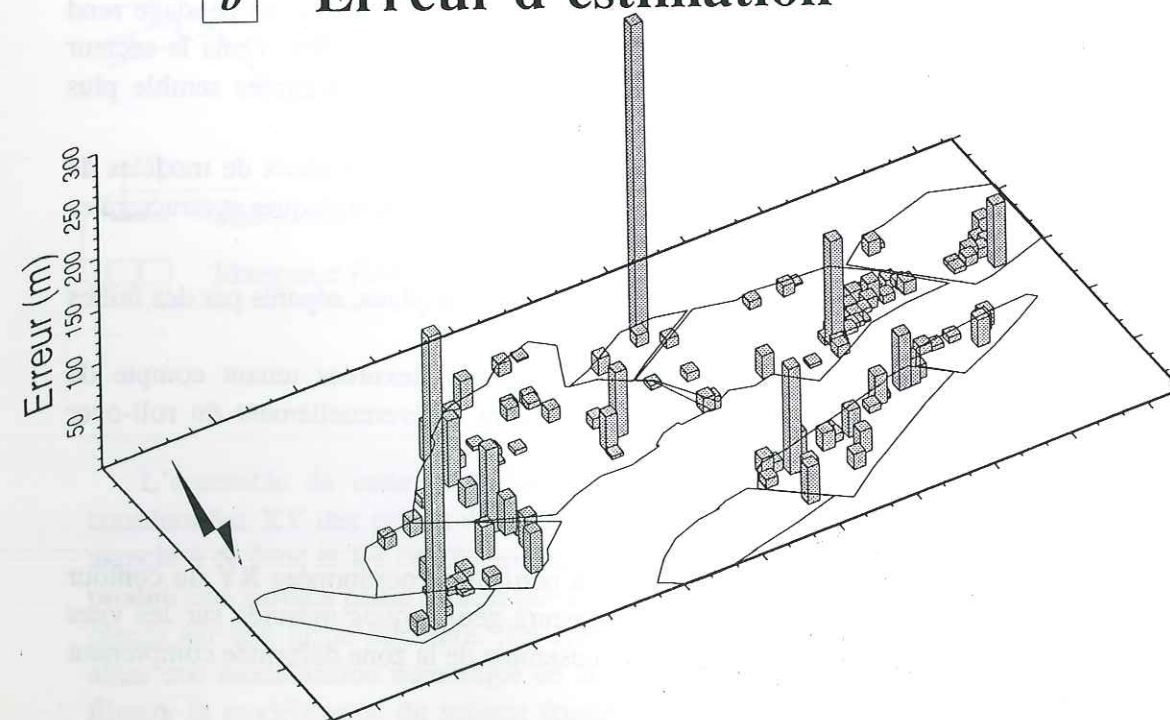
Compte-tenu de l'utilisation des images pour détecter les marqueurs géologiques, il est possible que les mesures de pendages soient effectuées seulement sur les marqueurs les plus visibles sur les images, c'est-à-dire, sur les marqueurs bien dégagés par l'érosion et possédant les pendages les plus forts. L'analyse de la répartition des pendages mesurés sur le secteur de Ba'tays (figure V.14) montre que ce n'est pas le cas. Chaque pendage mesuré est replacé sur le secteur étudié, ainsi que l'erreur d'estimation associée et la cartographie des blocs. Les pendages mesurés sont répartis aléatoirement sur l'ensemble de la zone déformée. Cette figure V.14 montre également qu'il n'existe pas de corrélation entre l'erreur d'estimation associée à chaque pendage et la localisation de la mesure de ce même pendage. Des erreurs d'estimation fortes se trouvent aussi bien dans la partie amont des blocs basculés (près de la crête, au nord sur la figure) qu'au pied de ces mêmes blocs. Les erreurs ne sont donc absolument pas corrélées avec la localisation de la mesure, pas plus qu'elles ne le sont avec la valeur du pendage calculé.

Figure V.14 Localisation des marqueurs géologiques mesurés dans le secteur de Ba'tays et pendages associés. a- Répartition des pendages mesurés; b- Répartition de l'erreur d'estimation associée à ces pendages.

a Variations des pendages mesurés



b Erreur d'estimation



V.2 Modélisation des blocs basculés

V.2.1 Hypothèses sur la géométrie tridimensionnelle des blocs

Le choix d'un modèle de blocs basculés va conditionner toutes les étapes conduisant à la quantification de l'extension. Il s'appuie sur la connaissance géométrique de la zone déformée. L'analyse structurale de la marge sud du Yémen, présentée dans le chapitre 3, révèle l'existence de différences entre les secteurs de blocs basculés étudiés.

Dans le secteur de Umm Shatt, les blocs basculés sont étroits (2 km environ) et peu allongés (5 à 8 km). La déformation interne peut être importante par endroits (dykes notamment). Par contre, sur le terrain, comme sur les images ou les vues perspectives, il est difficile de mettre en évidence des variations de pendage des blocs depuis leur crête jusqu'à leur base. L'existence d'un roll-over au dos des blocs est difficile à envisager. La présence d'un remplissage volcano-sédimentaire détritique en fond de vallée peut éventuellement masquer l'existence d'un crochon de faille à la base du bloc, mais son importance relative, par rapport à la largeur du bloc notamment, reste minime. Dans ce secteur, la géométrie des failles est inconnue, mais compte-tenu des observations précédentes (largeur des blocs), il semble que le niveau sur lequel elles s'enracinent ne soit pas très profond. On peut donc faire l'hypothèse que dans ce secteur, des blocs basculés rigides et plans séparés par des failles planes constituent une bonne modélisation du système déformé.

Dans le secteur de Ba'tays, les blocs basculés sont beaucoup plus larges (5 à 8 km) et s'étendent latéralement sur de grandes longueurs (jusqu'à 10 km). De plus, l'analyse structurale sur le terrain révèle des variations de pendages depuis la crête vers le bas des blocs, pour les différentes strates sédimentaires mesurées. Ceci est également visible à partir des mesures réalisées sur les MNT (figure V.14a). Les pendages les plus forts se trouvent à l'amont des blocs et diminuent vers le bas. Cette variation de pendages au dos des blocs, est probablement associée à l'existence d'un rebroussement des couches à proximité des failles (crochon) et au glissement gravitaire observé au dos de certains blocs (chapitre 3). L'existence de failles d'extrados qui accentuent le pendage des blocs est peut-être associée à un phénomène de roll-over, marqué surtout dans la partie médiane des blocs. Il est difficile de définir précisément la géométrie des failles avec les données disponibles. Cependant, l'existence de variations de pendage rend peu crédible la modélisation des blocs de ce secteur par des surfaces planes. Dans le secteur de Ba'tays, un modèle de blocs basculés matérialisés par des surfaces flexurées semble plus approprié.

Les différences de géométrie des zones déformées impliquent donc le choix de modèles de blocs basculés différents et une exploitation différente des données topographiques et structurales disponibles. Deux modélisations sont retenues :

- un système de blocs basculés représenté par des blocs rigides et plans, séparés par des failles planes (modèle "PLAN"),
- un système de blocs basculés matérialisé par des surfaces flexurées tenant compte de l'existence de crochons de faille, du glissement gravitaire et éventuellement du roll-over (modèle "FLEXURÉ").

V.2.2 Calcul des modèles

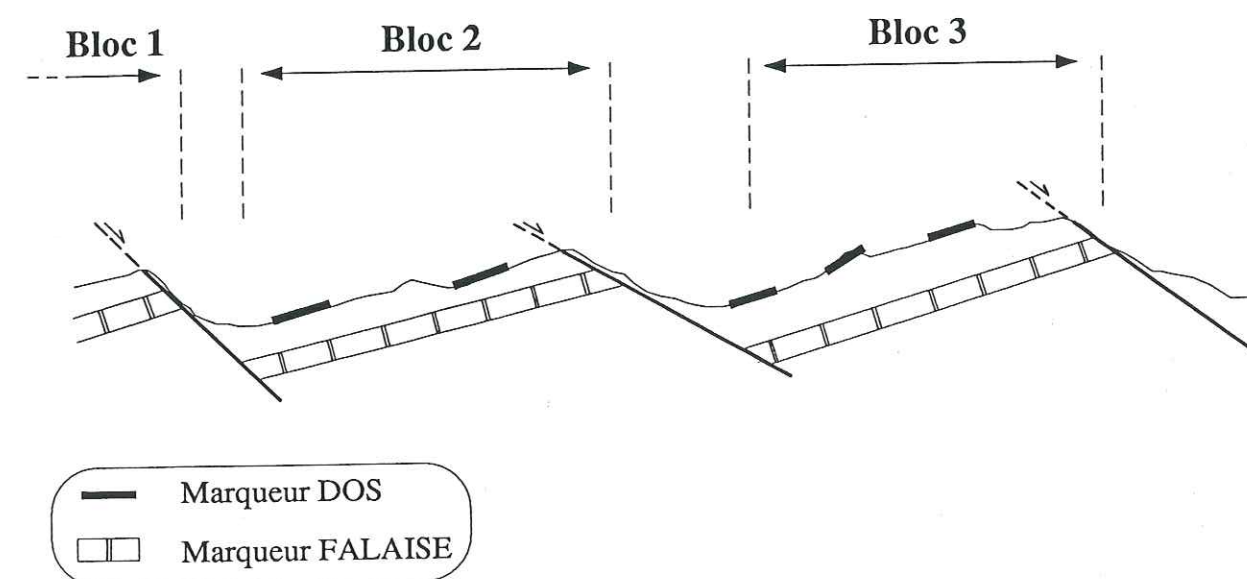
L'obtention de l'un ou l'autre des modèles se fait à partir des coordonnées XY du contour des blocs basculés et des coordonnées XYZ des marqueurs géologiques mesurés sur les vues perspectives. Chaque bloc est traité séparément, puis l'ensemble de la zone déformée comprenant tous les blocs est reconstituée.

2.2.1 Modèle PLAN

Pour le modèle plan, un marqueur "dos" (figure V.9) est choisi parmi toutes les mesures effectuées précédemment afin d'affecter une valeur de pendage au bloc. Ce choix s'effectue en tenant compte des données de terrain, et de la qualité du pendage mesuré. Le marqueur choisi correspond à une série de points XYZ définissant l'équation d'un plan. Chaque point XY du contour d'un bloc, appartient par définition à ce bloc et vérifie donc l'équation du plan. Une valeur d'altitude est alors calculée à partir de cette équation, pour chaque point de contour.

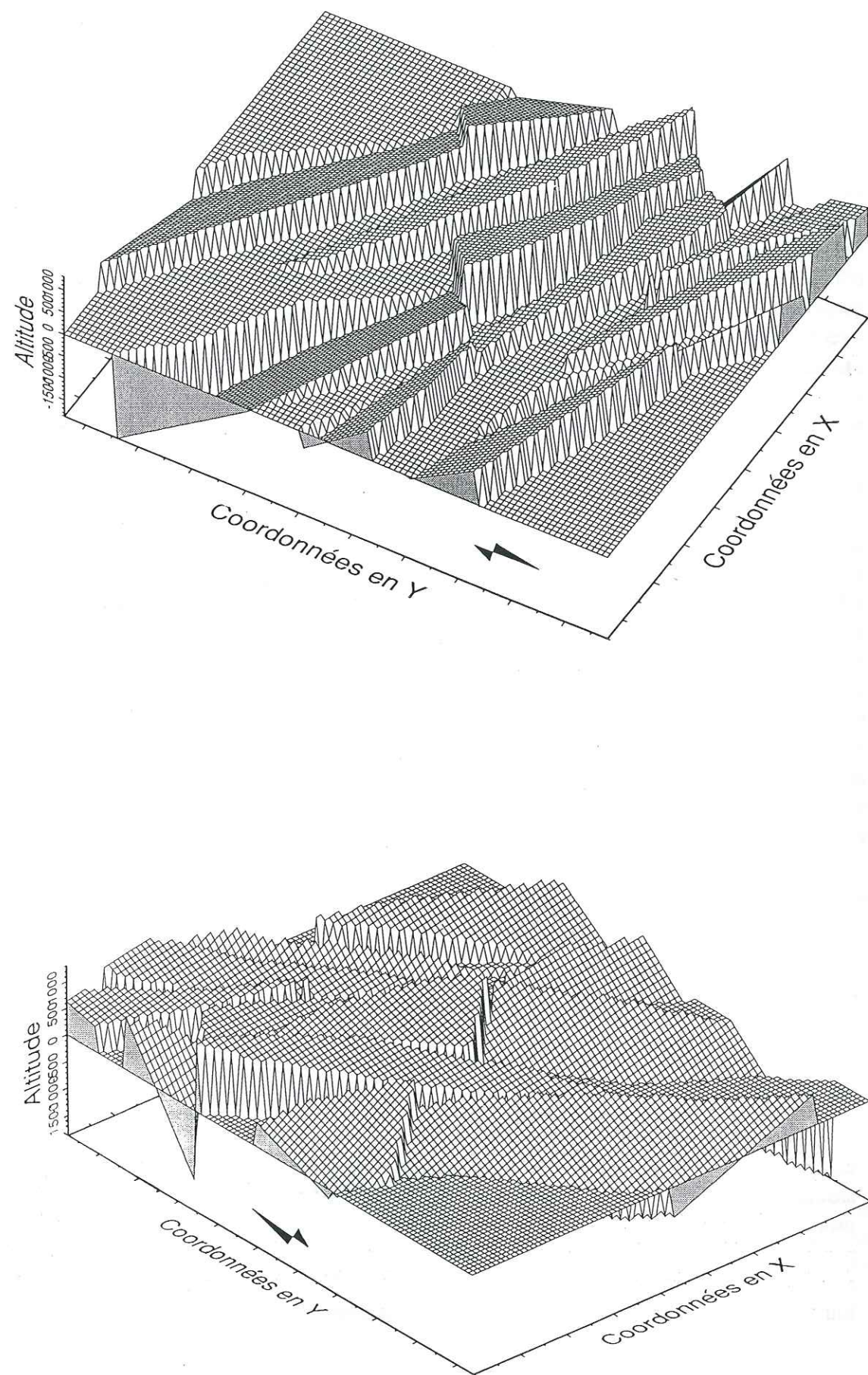
Le calcul de la surface du bloc s'effectue de la même façon, en affectant une valeur d'altitude à chaque point appartenant à la surface. Pour contrôler le nombre de points de la surface plane, une grille régulière avec un pas défini est superposée à chaque bloc basculé. Les altitudes de chacun des nœuds de la grille sont calculées à partir de l'équation du plan. Ensuite, un marqueur "falaise" (figure V.9) est mesuré à l'amont du bloc basculé. Il définit l'altitude de l'horizon-repère. Ce marqueur appartient également au bloc basculé et ses coordonnées XYZ doivent vérifier l'équation du plan définie précédemment. Ceci permet de caler les altitudes de tous les points du bloc en fonction de l'altitude du marqueur "falaise" (figure V.15).

Figure V.15 Coupe schématique montrant le principe d'obtention du modèle PLAN. Pour chaque bloc (1,2 ou 3), un pendage est choisi (marqueur "dos") puis reporté à l'altitude du marqueur "falaise".



L'ensemble de cette procédure est réalisée avec le programme *zcalc.c*, qui utilise les coordonnées XY des points de contour du bloc, les coordonnées XYZ du marqueur "falaise" associé à ce bloc et les coefficients a,b,c de l'équation du plan défini par le marqueur "dos". Il produit une surface plane limitée par les contours du bloc, avec des points de coordonnées XYZ placés sur une grille régulière. En effectuant ce travail pour l'ensemble des blocs, on obtient alors une modélisation numérique de la zone déformée. L'exemple présenté sur la figure V.16 illustre la modélisation du secteur étudié près de Umm Shatt.

Figure V.16 Modélisation numérique du secteur de Umm Shatt (vues perspectives depuis le Nord-Est et depuis le Sud-Ouest). Seules les surfaces de blocs sont représentées. Le pas de la grille est de 100 m.

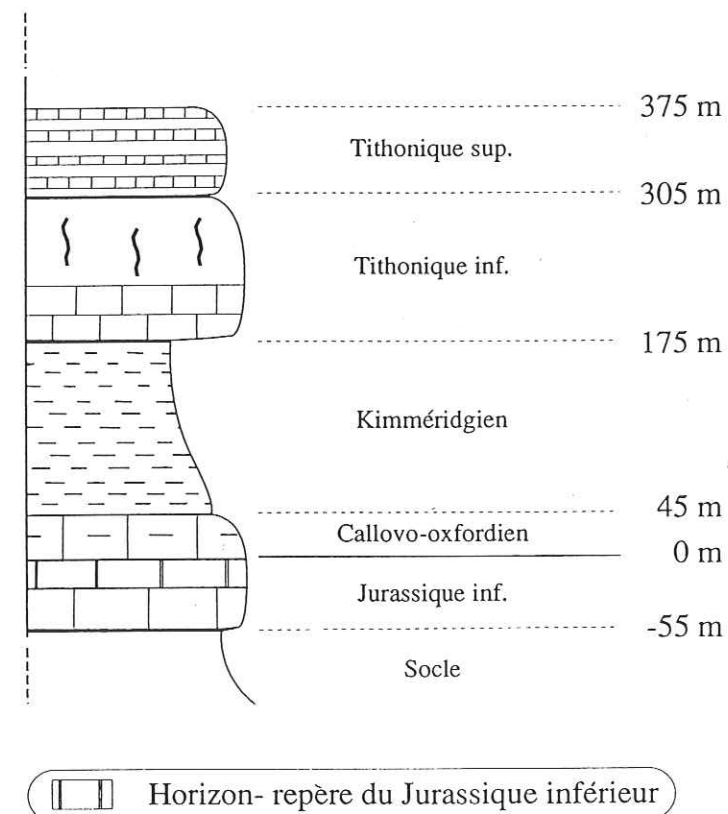


2.2.2 Modèle FLEXURÉ

Compte-tenu des variations de pendage au dos des blocs, il n'est plus possible de choisir un seul marqueur "dos", représentatif de chacun des blocs basculés, mais il faut tenir compte de l'ensemble des mesures réalisées sur les MNT. Celles-ci ne sont pas effectuées systématiquement sur le même horizon géologique et à plus forte raison sur l'horizon-repère. Il est donc nécessaire de situer chacun des marqueurs dans la colonne stratigraphique du secteur étudié, pour connaître leur position exacte en altitude, par rapport au marqueur "falaise" (horizon-repère).

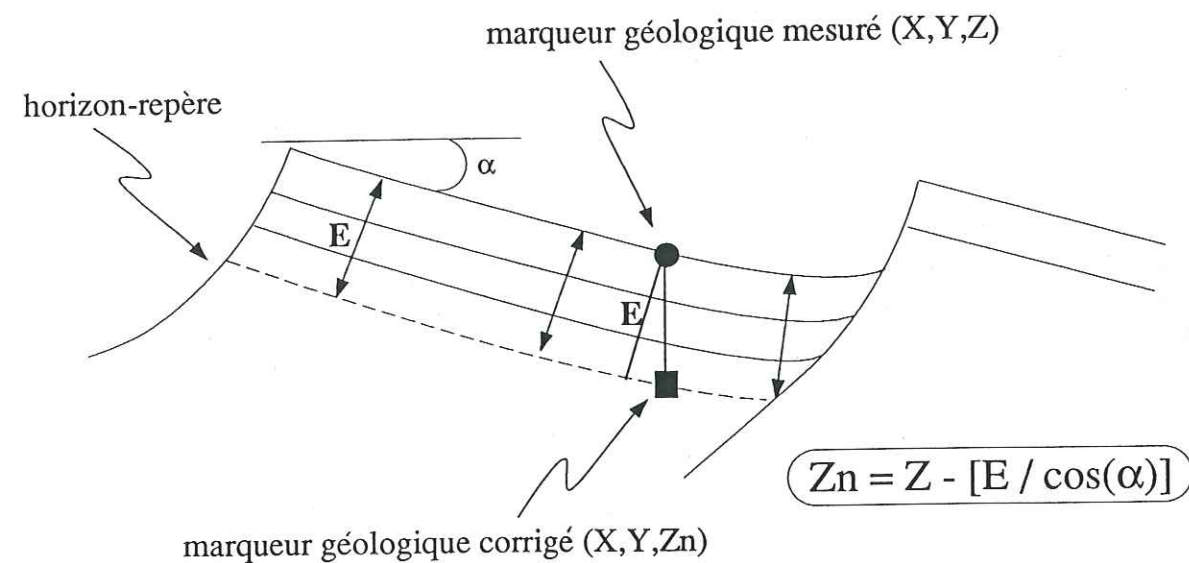
L'établissement de cette colonne est effectué directement à partir des MNT, par repérage de l'altitude des couches géologiques. Localement, des disparités entre les épaisseurs mesurées pour une même couche géologique peuvent apparaître. Elles sont liées à des erreurs sur le MNT, à de faibles variations d'épaisseur d'un point à l'autre de la zone déformée (action différentielle de l'érosion par exemple). Ces erreurs sont contrôlées à l'aide des cartes géologiques disponibles et des données de terrain, de façon à n'établir qu'une seule colonne pour l'ensemble du secteur étudié (figure V.17). Ce travail n'a été effectué que dans le secteur de Ba'tays où le modèle flexuré était envisageable.

Figure V.17 Colonne stratigraphique établie à partir de mesures sur le MNT du secteur de Ba'tays.



L'horizon géologique choisi comme repère dans ce secteur est localisé sur la colonne stratigraphique, ainsi que les autres marqueurs géologiques (marqueurs "falaise" et marqueurs "dos"), mesurés sur le MNT (figure V.17). En prenant comme altitude de base, l'altitude de l'horizon-repère, il est possible de caler en altitude l'ensemble des marqueurs mesurés. Ce calage s'effectue sans changer les coordonnées XY de chacun des marqueurs, ce qui revient à faire l'hypothèse que l'épaisseur de la série est constante en tout point et que les "plis" observés à la surface du bloc sont concentriques (figure V.18).

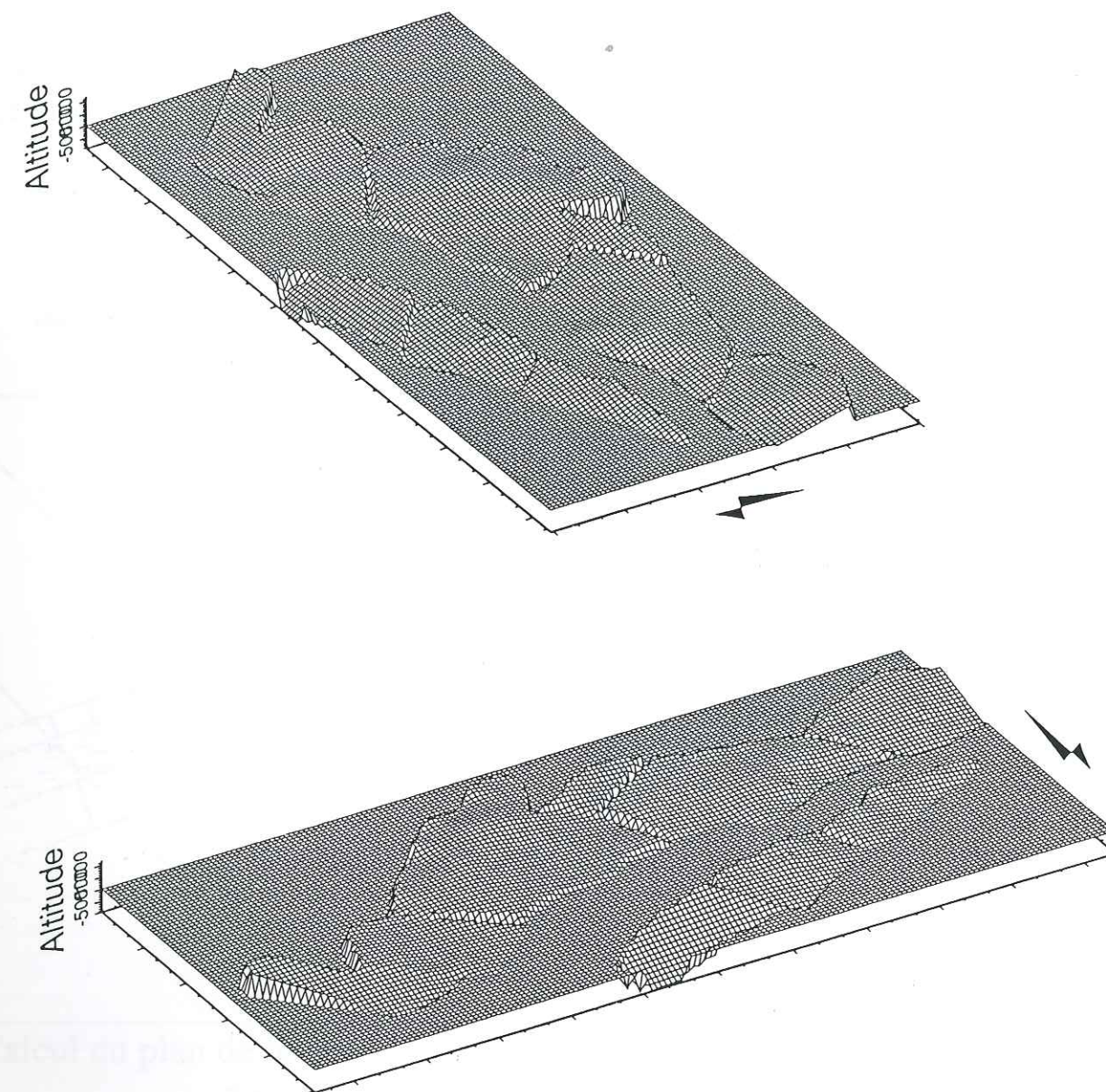
Figure V.18 Principe de calage des marqueurs géologiques sur l'altitude de l'horizon-repère, dans le cas du modèle FLEXURÉ. La coupe présentée est construite d'après la figure III.15.



Les coordonnées des marqueurs mesurés, rectifiées en Z, sont ensuite interpolées localement sur chaque bloc basculé, pour obtenir une surface flexurée (programme GMT-surface). La figure V.19 illustre la modélisation de la zone déformée du secteur de Ba'tays.

Sur cette modélisation, le bloc 6 (figure V.5) est construit à partir du modèle plan. En effet, ce bloc est situé en bordure de la zone étudiée et les données topographiques disponibles dans cette partie du secteur sont de mauvaise qualité (effet de bord). Ceci empêche la réalisation d'un grand nombre de mesures sur la surface du bloc et, de ce fait, sa topographie est mal définie (peu de pentages valables, obtenus pour les marqueurs géologiques mesurés).

Figure V.19 Modélisation numérique du secteur de Ba'tays (vues perspectives depuis le Nord-Ouest et le Sud-Est). Seules les surfaces flexurées sont représentées. Le pas de la grille est de 300 m.



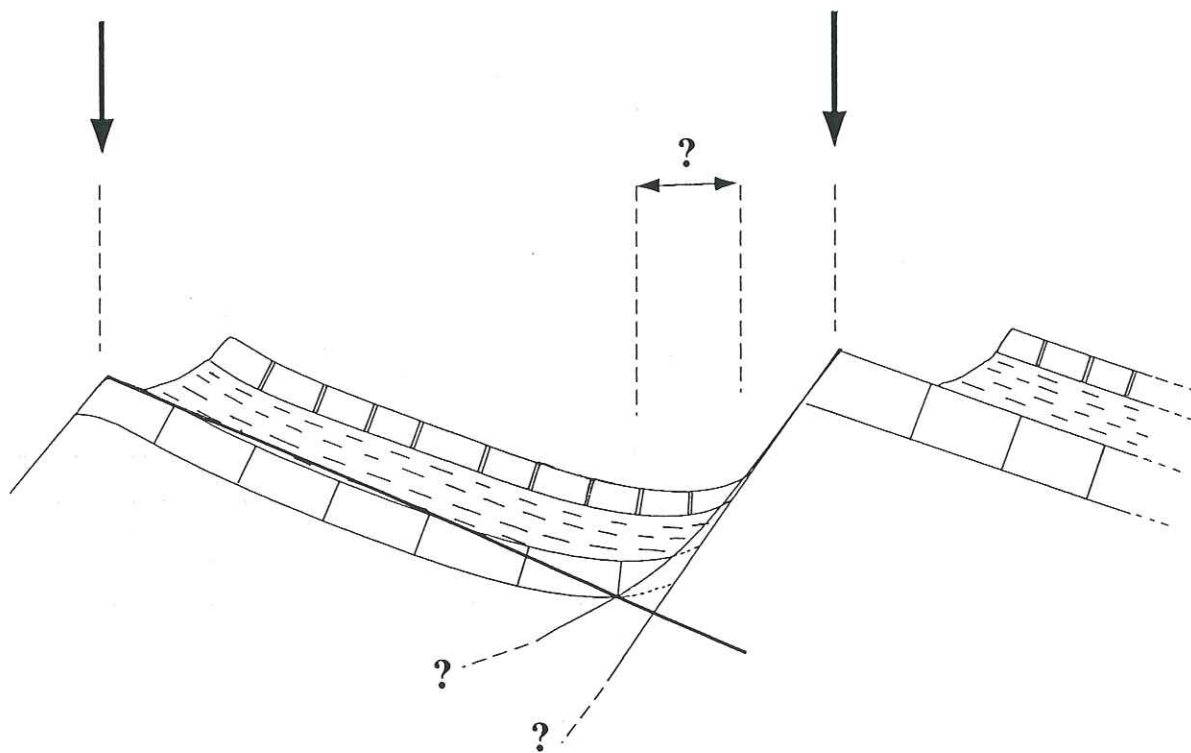
V.2.3 Validité des modèles

Les deux modèles utilisés au cours de cette étude ne tiennent pas compte de la déformation interne des blocs. Pourtant, celle-ci s'exprime sous forme de dykes dans le secteur de Umm Shatt ou de failles secondaires découpant le dos des blocs basculés à Ba'tays. Dans le cas du modèle plan, on peut considérer en première approximation, que les blocs sont plans et se déforment de façon rigide, ce qui n'est probablement pas le cas en réalité. Pour le modèle flexuré, l'existence de failles secondaires qui découpent les blocs et accentuent les crochons de faille, induit en première approximation, la formation de plis qui sont pris en compte par la courbure de la surface de chacun des blocs basculés. L'utilisation de l'un ou l'autre des modèles

pour l'analyse de la déformation, sans tenir compte de cette déformation interne, conduira donc à sous-estimer la valeur de l'extension dans chacun des secteurs.

Une autre limite aux modèles utilisés correspond à la méconnaissance de la géométrie des failles. Celle-ci peut éventuellement être décrite à partir de la forme de la surface des blocs basculés [Gibbs, 1984; Davison, 1986; Dula, 1991; Xiao et Suppe, 1992], mais le contrôle de cette géométrie sans données sismiques est difficile à obtenir. En coupe, la longueur de l'horizon-repère peut varier de façon non-négligeable selon la forme de la faille en profondeur (figure V.20), et le choix du modèle de bloc basculé (plan ou flexuré) est alors très important.

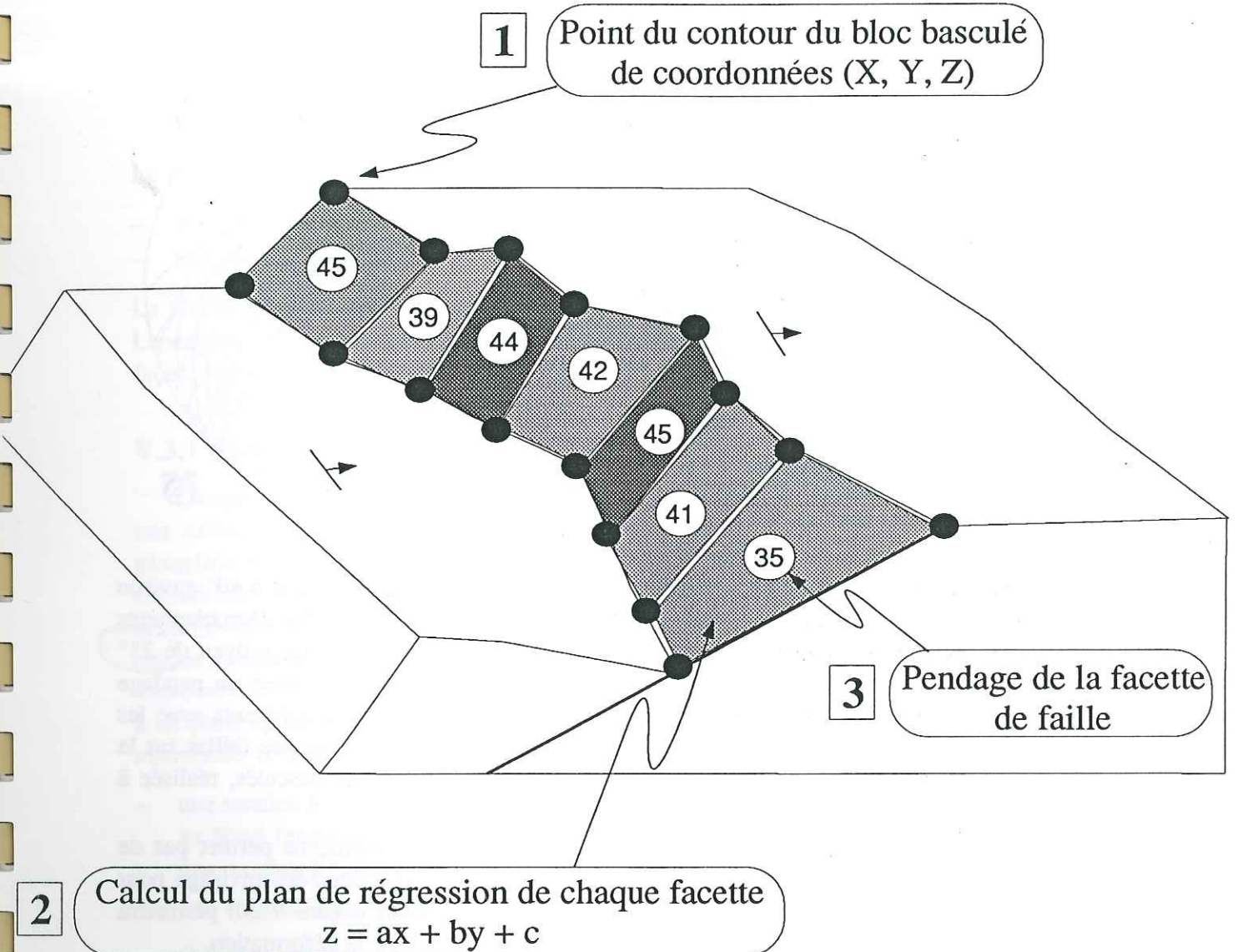
Figure V.20 Influence de la géométrie de la faille sur la définition du contour des blocs et le choix du modèle. Cette coupe schématique est construite d'après celle réalisée dans le secteur de Ba'tays (figure III.15).



— Modèle PLAN

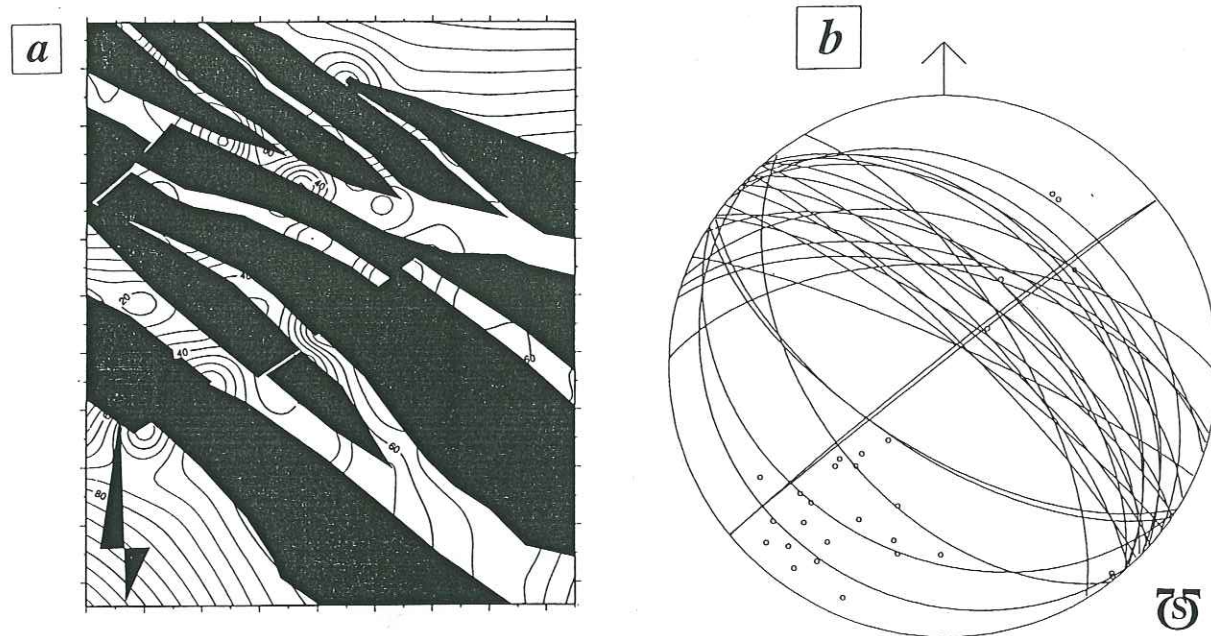
Dans le secteur de Umm Shatt, les variations de pendage au dos des blocs ne sont pas détectables, et l'hypothèse de blocs plans, séparés par des failles planes est acceptable. Dans ce cas, les coordonnées XYZ de chacun des blocs de la zone déformée étant connues, il est possible de reconstituer les plans de failles qui séparent ces blocs, ce qui permet de vérifier la validité de ce modèle. Les plans de faille sont définis entre les points de contour de deux blocs adjacents, qui se correspondent de part et d'autre de la zone de faille (figure V.21). Ceci revient à découper chaque plan de faille en une série de petites facettes et de calculer leur orientation. Pour chaque groupe de points ainsi défini (facette), un calcul de régression plane permet d'obtenir une valeur locale de pendage (programmes *regplanf.c* et *caraplan.c*) qui est alors affectée à chacun des points composant le groupe (figure V.21).

Figure V.21 Principe d'établissement de la carte de pendages des failles, dans le secteur de Umm Shatt, à partir du modèle plan de blocs basculés.



Les orientations calculées sont représentées sur un stéréogramme (canvas de Schmidt, projection dans l'hémisphère inférieure). Chaque point servant à la définition d'une facette est repéré sur l'ensemble de la zone déformée par ses coordonnées XY. En construisant un fichier de points repérés par leur coordonnées XY et affectés d'une valeur de pendage, il est possible d'interpoler ces données sur une grille régulière (GMT-surface). Ceci permet de reconstituer la carte des pendages des failles (figure V.22a). Les pendages obtenus n'ont qu'une valeur locale, sur chaque facette du plan de faille. L'interpolation des données produit localement des gradients de pendages indiquant l'existence de courbures sur certains plans de failles (plans par définition !).

Figure V.22 Analyse des pendages des failles dans le secteur de Umm Shatt. a- Carte des pendages des failles (failles normales et décrochements). Les blocs basculés sont représentés en noir; b- Stéréogramme (canvas de Schmidt). Les cercles représentent les pôles des plans.



Les pendages obtenus se répartissent autour de deux valeurs moyennes, l'une à 40° environ et l'autre à 90° (figure V.22b). Les pendages à 90° traduisent l'existence des décrochements entre les blocs. Les pendages autour de 40° sont compatibles avec le pendage moyen de 25° à 30° des blocs basculés, dans l'hypothèse où les failles normales s'initient avec un pendage de 60° environ [Brun et Choukroune, 1983]. Ces pendages sont également cohérents avec les pendages déduits de l'analyse structurale sur le terrain. Ce calcul du pendage des failles sur le modèle plan permet de vérifier, à posteriori, que la cartographie des blocs basculés, réalisée à partir de l'interprétation des images, est correcte (figure V.15).

L'utilisation de deux modèles différents, dans deux secteurs différents, ne permet pas de comparer ni de discuter la validité de chacun d'eux. Un modèle plan a donc été envisagé pour le secteur de Ba'tays. Ce modèle, quoique peu réaliste pour ce secteur (figure V.20) permettra d'analyser les apports de chacun des modèles, au cours de l'analyse de la déformation.

V.3 Restauration des structures déformées

L'existence des failles séparant les blocs basculés, implique nécessairement des discontinuités dans la répartition spatiale de l'horizon-repère. La restauration de la zone déformée nécessite donc deux étapes :

- la restauration, au sens strict, des surfaces de chaque bloc basculé, dans leur état de non-déformation,
- l'ajustement des surfaces restaurées les unes par rapport aux autres afin de reconstituer la forme générale de l'ensemble du secteur étudié avant déformation.

La première étape consiste à retrouver la géométrie de la surface du bloc avant déformation :

- soit par "débasculement" dans le cas d'une surface plane,
- soit par dépliage dans le cas d'une surface flexurée.

La procédure de restauration sera donc différente selon le modèle choisi pour la zone déformée. La seconde étape concerne la totalité des blocs restaurés et l'ajustement se fera donc de la même façon, quelque soit le modèle de blocs basculés employé.

V.3.1 Modèle PLAN

Chaque bloc basculé est repéré par les points de son contour (coordonnées XYZ) et représente une surface plane dont l'équation est connue. A partir de ces données, il faut retrouver la géométrie de cette surface dans son état de non-déformation c'est-à-dire chercher les nouvelles coordonnées XY de chaque point de la surface pour lesquelles, par convention, l'altitude sera nulle ($Z=0$). La méthode développée ici consiste à appliquer une combinaison de trois rotations rigides successives, par rapport à chacun des axes du repère orthonormé choisi pour décrire les coordonnées XYZ des points des blocs. Le centre de chaque rotation est identique, et correspond à un point appartenant à la surface du bloc. Les trois rotations sont exprimées sous une forme matricielle et sont les suivantes :

- une rotation R1 permettant de replacer la direction de l'horizontale de la surface parallèlement au Nord (angle θ = direction de l'horizontale du bloc),
- une rotation R2 permettant de remettre la surface à l'horizontale (angle ϕ = pendage du bloc),
- une rotation R3 permettant de replacer le bloc dans sa configuration initiale.

Ce calcul (programme *bascul.c*) est appliqué à chaque bloc basculé, de façon indépendante. On obtient alors les nouvelles coordonnées XY0 des points formant le contour de chacun des blocs.

V.3.2 Modèle FLEXURÉ

Le modèle flexuré nécessite l'utilisation d'une procédure plus complexe pour retrouver l'état ante-déformation. Le programme UNFOLD utilisé ici, a été développé en Fortran au L.G.I.T. [Université de Grenoble 1], et fonctionne sur station de travail. Il permet de remettre à l'horizontale une surface plissée à partir d'une méthode d'éléments finis. On pourra trouver une explication détaillée du programme dans la thèse de Guillier [1991]. Le but de ce paragraphe n'est pas de reprendre en détail les principes de fonctionnement du programme, mais de présenter rapidement le principe du calcul proposé par Gratier et co-auteurs [1988, 1991, 1993], avant de voir son application aux structures du secteur de Ba'tays.

3.2.1 Principe du dépliage des structures

Le principe de calcul consiste à discrétiser une surface plissée donnée en un certain nombre de triangles. Chaque triangle est ensuite remis à l'horizontale (par convention à $Z=0$) puis, les vides et les recouvrements éventuels entre triangles sont alors minimisés, par itérations d'ajustage successives. Les itérations s'arrêtent lorsque le facteur de qualité, défini par l'utilisateur ou par le programme lui-même, est atteint. Ce facteur de qualité correspond à un test de la minimisation effectuée, en fonction de la distance entre triangles adjacents.

Le programme UNFOLD s'applique à une surface définie par des points régulièrement espacés, dont les coordonnées XYZ sont connues. Son utilisation est précédée de celle du programme Fortran *verification.f* qui teste si la discrétisation en triangles est possible pour la surface analysée. Ainsi, pour les surfaces déformées, certaines contraintes géométriques sont nécessaires pour améliorer la qualité du dépliage [Guillier, 1991; J.P. Gratier, communication personnelle]. La surface doit répondre aux conditions suivantes:

- coordonnées XYZ des points de la surface strictement positives,
- fichier XYZ de départ rangé en colonnes à X constant et Y croissant,
- pour chaque colonne à X constant, les coordonnées en Y doivent être continues et régulières,
- dans la colonne à X minimum, la valeur de Y minimale doit être inférieure à la valeur de Y maximale dans la colonne à X maximum.

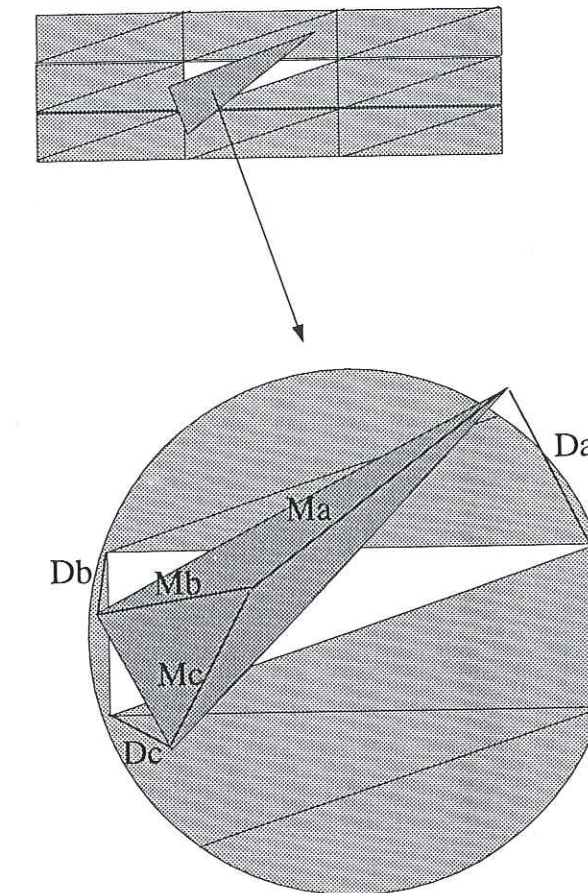
Ces diverses conditions nécessitent parfois de tourner la surface initiale par rapport à un miroir vertical ou horizontal (programme *rotsurf.c*).

3.2.2 Validation du dépliage

Les critères de qualité du dépliage définis pour UNFOLD correspondent à des indices d'erreur qui concernent la minimisation des vides et recouvrements entre triangles adjacents [Guillier, 1991; Guillier et Gratier, 1991; Gratier et Guillier, 1993]. Ces indices expriment soit l'erreur moyenne de restauration (indice F), soit l'erreur locale de dépliage (indice f). Ils sont basés tous les deux sur l'analyse de la distance inter-sommets entre les triangles et la place théorique qu'ils doivent occuper sur la surface dépliée. Cette distance est pondérée par les médianes de ces mêmes triangles [Guillier et Gratier, 1991; Gratier et Guillier, 1993] (figure V.23).

L'indice F correspond à la somme des distances inter-sommets (D) divisée par la somme des médianes (M). Cet indice est calculé après chacune des itérations d'ajustage des triangles. C'est lui qui définit la qualité de la restauration de la surface. L'indice f correspond au même calcul que F , mais exprimé localement pour chaque triangle. Il fournit une cartographie des erreurs d'ajustage sur la surface dépliée [Guillier, 1991].

Figure V.23 Principe d'ajustage des triangles entre eux d'après Gratier et Guillier [1993]

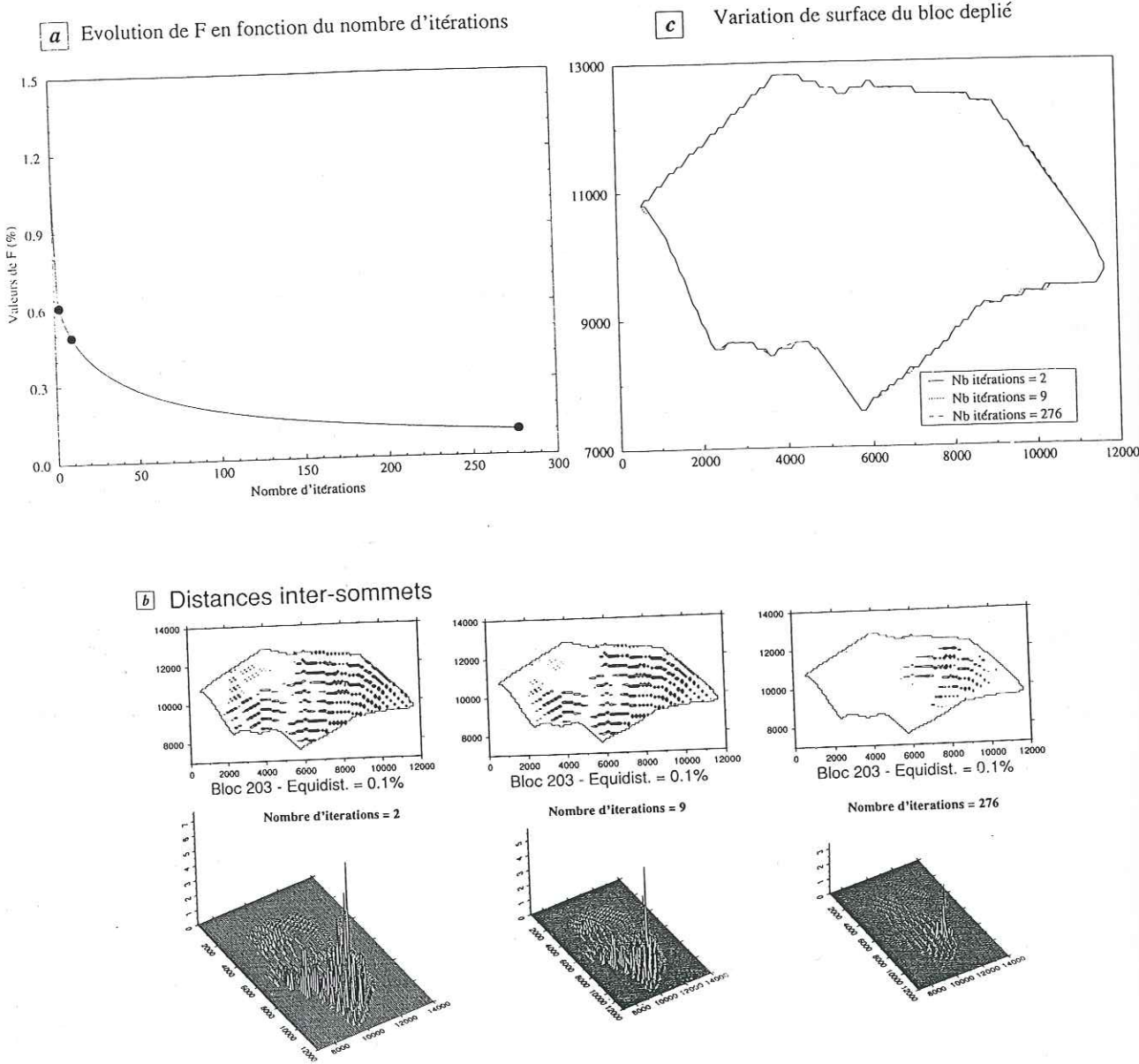


$$\left. \begin{array}{l} D = Da + Db + Dc \\ M = Ma + Mb + Mc \end{array} \right\} \rightarrow f = D / M$$

Parallèlement, l'évolution de la valeur de F est analysée en fonction du nombre d'itérations. L'obtention d'un palier pour la valeur de F indique la limite de convergence du programme UNFOLD. On peut alors considérer que la surface est dépliée correctement. Cependant, le nombre d'itérations et la valeur de F obtenue sont très variables d'une surface à l'autre. Dans le cas d'une surface "dépliable", F atteint très vite des valeurs inférieures à 0,5%. Faire converger le programme pour de nombreuses itérations n'est alors pas nécessaire et quelques itérations d'ajustage semblent suffire pour déplier correctement la surface. Cela consiste le plus souvent à réduire de moitié la valeur de F donnée à la fin de la première itération. De plus, la cartographie de f indique de faibles valeurs de l'erreur locale, en général inférieures à 1%. Ceci est illustré par la figure V.24 où plusieurs calculs de dépliage sont comparés, pour un nombre d'itérations variable et pour une même surface (bloc 203 sur la figure V.5).

Pour des surfaces "non-dépliables", comme le cas d'un dôme testé par Guillier [1991], les valeurs des indices F et f sont beaucoup plus élevées et la répartition des triangles sur le dessin de la surface résultante indique clairement la non-validité du dépliage [Gratier et Guillier, 1993]. Ces surfaces "non-dépliables" sont des surfaces pour lesquelles les hypothèses d'épaisseur constante et d'étirement nul parallèlement à la surface neutre ne sont pas respectées.

Figure V.24 Influence du nombre d'itérations sur le dépliage du bloc 203. a- Evolution du facteur F en fonction du nombre d'itérations; b- Cartographie des erreurs inter-sommets associées au dépliage; c- Variations de surface du bloc déplié en fonction du nombre d'itération.



Dans le cas des blocs basculés du secteur de Ba'tays, ces hypothèses semblent vérifiées et l'analyse des valeurs d'indices d'erreur permet de le confirmer. En effet, les variations locales ne dépassent pas 1% pour tous les blocs dépliés et les valeurs de F sont relativement faibles dès la deuxième itération (figure V.25).

Tableau V.25 Indices d'erreur de dépliage pour les blocs du secteur de Ba'tays

No	F(%)			f(%)	nombre d'itérations
	initial	2ème itération	dernière itération	bornes inf. et sup.	
1	0,161	0,102	0,08	0 / 0,25	8
201	0,306	0,186	0,15	0 / 0,54	6
202	1,220	0,808	0,5	0,002 / 55,964	34
203	0,651	0,356	0,2	0 / 1,275	19
204	0,421	0,209	0,1	0 / 0,349	10
3	0,790	0,508	0,4	0 / 1,23	17
4	0,573	0,323	0,2	0 / 0,676	14
5	0,912	0,532	0,2	0 / 0,839	27

Les résultats complets (surface avant dépliage, à la première itération et surface dépliée), obtenus sur chacun des blocs du secteur de Ba'tays traités, ainsi que les paramètres de calcul sont présentés en annexe (Annexe 4). Le tableau V.25 visualise simplement le nombre d'itérations utilisées pour le dépliage des divers blocs du secteur ainsi que la valeur de F obtenue après dépliage et à la deuxième itération. Parmi tous ces résultats, seul le bloc 202 présente un maximum d'erreur locale assez important (environ 56%). Cependant, les visualisations de la surface après dépliage d'une part, et de la cartographie de l'erreur locale d'autre part, montrent que cette erreur est localisée à une extrémité de la surface (figure V.26).

Exceptée cette erreur, les valeurs de f sont comprises entre 0,002% et 0,751%. La visualisation de la surface avant dépliage n'indique pas d'erreurs d'interpolations particulières. Il est probable que cette erreur très localisée correspond à une effet de bord qui apparait lors du dépliage de la surface du fait de sa forme en pointe (figure V.26). Les paramètres du calcul du dépliage du bloc 202 ne sont donc pas changés mais, il faudra corriger localement le contour de ce bloc avant de l'utiliser pour quantifier l'extension.

Parallèlement au dépliage des blocs flexurés, une surface plane, construite selon le principe du modèle plan, a été dépliée pour tester le programme UNFOLD. Cette surface est modélisée à partir des mêmes points de contour pour le bloc considéré (coordonnées XY du bloc 202). Le pendage affecté est de 37° et la direction N66 (figure V.27).

Figure V.26 Résultats du dépliage du bloc 202. a- Cartographie de la surface dépliée et localisation de la zone d'erreur; b- Cartographie des erreurs inter-sommets.

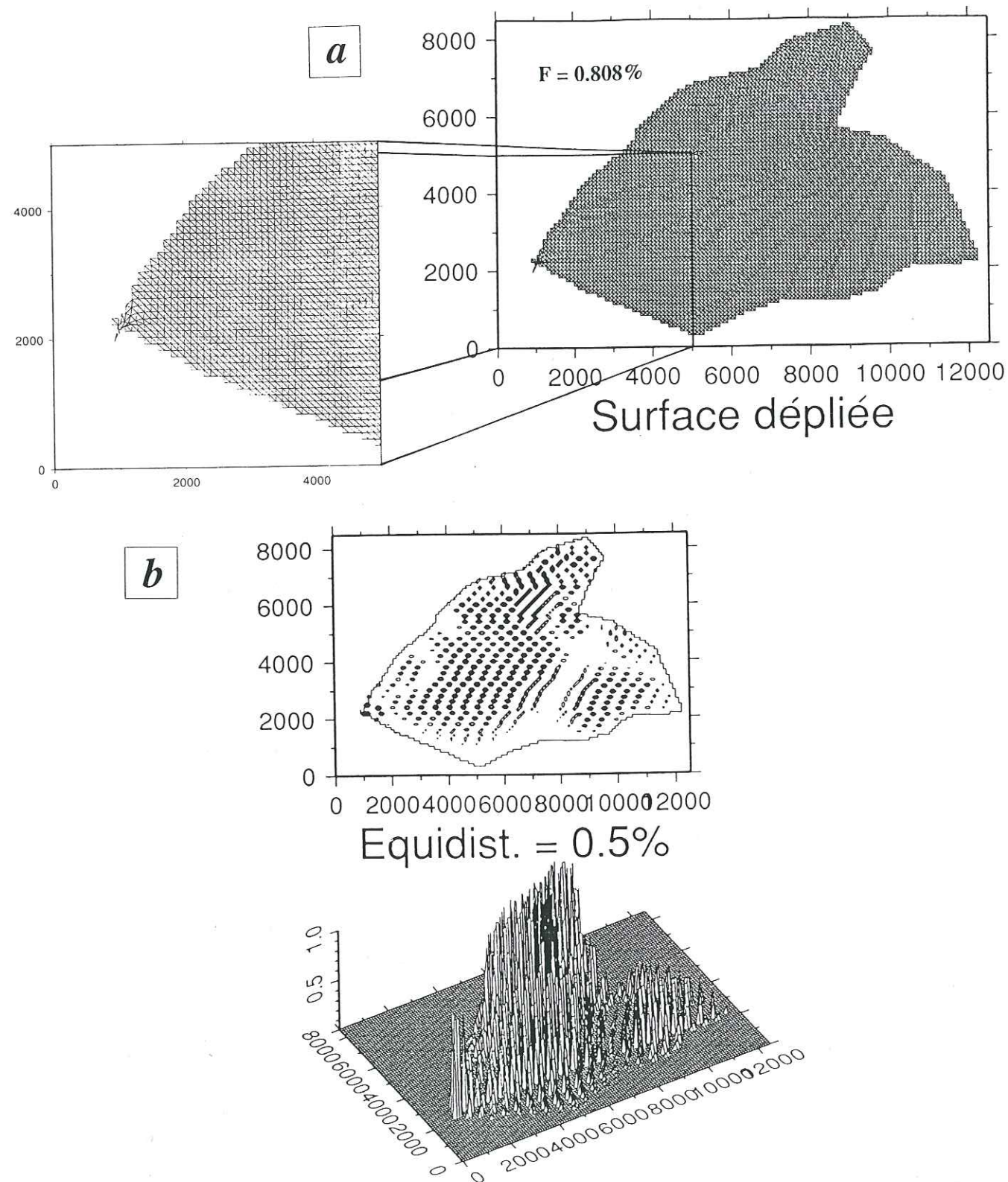
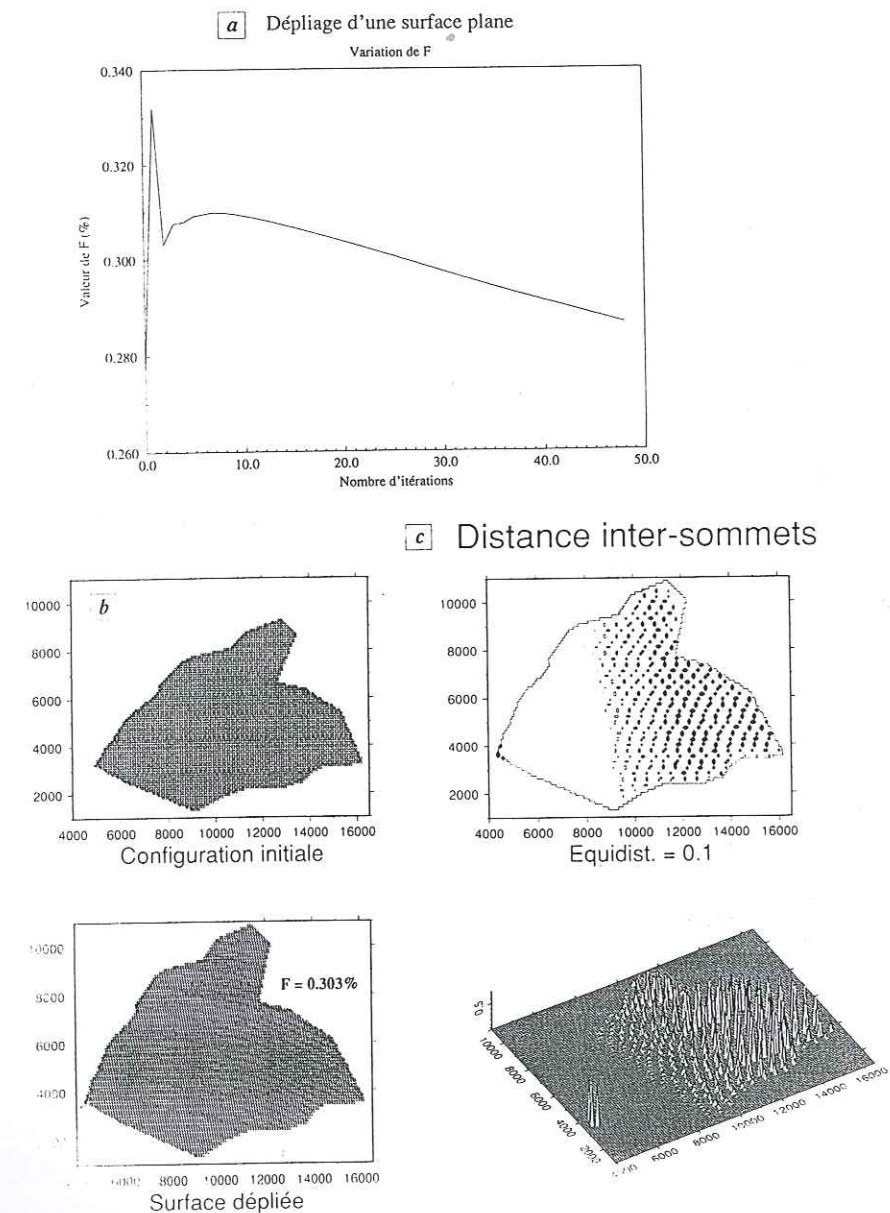


Figure V.27 Résultats du calcul du dépliage de la surface plane. a- Variation de F en fonction du nombre d'itérations; b- Cartographie de la surface avant et après dépliage; c- Cartographie de l'erreur inter-sommets associée au dépliage.



L'utilisation d'images satellitaires de la zone déformée donne accès aux coordonnées XY du contour des blocs projeté sur un plan horizontal. De la même façon, la projection d'une ligne unitaire (L_0) pentée de 37° donne une ligne (L_1) de longueur $\cos(37^\circ)$. Ceci entraîne une variation de longueur de l'ordre de $(1 - \cos(37^\circ)) * 100 = 20,13\%$.

Après le dépliage de tous les triangles de la surface par le programme UNFOLD, le facteur F est de 0,276% (figure V.27a). A la première itération d'ajustage, F augmente brusquement (0,332%). Il reste ensuite supérieur à sa valeur initiale, même après 40 itérations (figure V.27a). Les valeurs de F restent cependant faibles, de même que les valeurs de f , comme le montre la cartographie des distances inter-sommets (figure V.27c). Le dépliage de cette surface plane après 5 itérations donne une variation entre surface avant dépliage et surface dépliée de 20,07%, tout à fait en accord avec l'ordre de grandeur de la variation attendue.

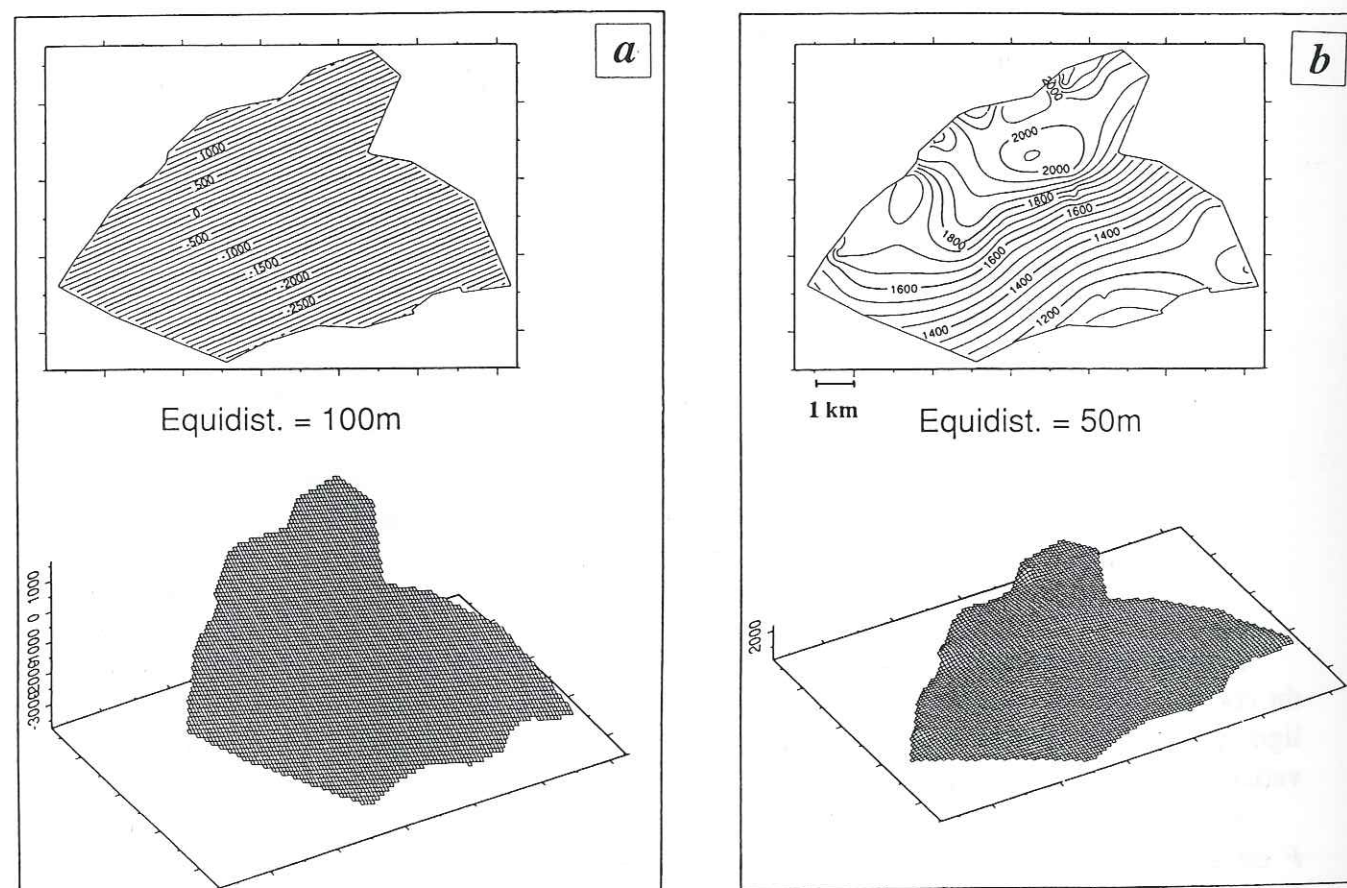
Le programme *bascul.c* est également appliqué sur cette même surface plane, et les contours obtenus par chacune des méthodes sont comparés. La variation relative entre la surface

débasculée et la surface déformée est de 20,03%. La différence entre la valeur obtenue par le programme *bascul.c* et le calcul trigonométrique sur une ligne s'explique probablement par la méthode employée pour calculer l'aire de chacune des surfaces. L'ensemble de ces résultats constitue une validation supplémentaire du programme UNFOLD, s'il en était besoin.

V.3.3 Comparaison des deux modèles

Même si cette première étape de restauration des structures déformées ne constitue qu'une phase intermédiaire, il est intéressant de comparer les résultats obtenus selon le modèle choisi. Cette comparaison ne peut se faire que sur le secteur de Ba'tays, où les données de terrain et les arguments tirés des images sont plutôt en faveur du modèle flexuré, mais où les deux modèles ont été construits. Elle est réalisée pour un même bloc (bloc 202), modélisé de deux façons différentes (figure V.28).

Figure V.28 Surfaces initiales, utilisées pour la comparaison des deux modèles. a- modèle PLAN, b- modèle FLEXURÉ

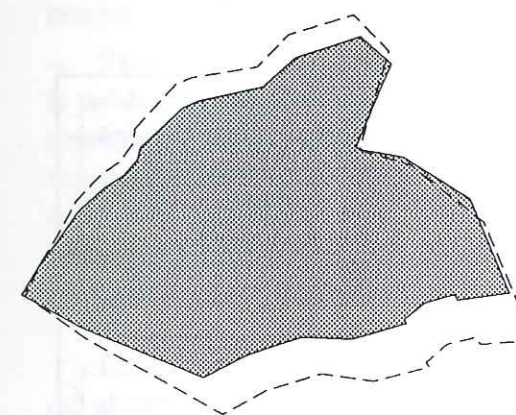


La surface plane possède un pendage de 37° et une direction de N66. Le débasculement de la surface plane (programme *bascul.c*) conduit à une variation de superficie par rapport au bloc initial de 20,03%. La surface dépliée montre quant à elle une variation de superficie de 2,15% avec la surface flexurée. Les paramètres de calcul du dépliage sont présentés sur la figure V.26.

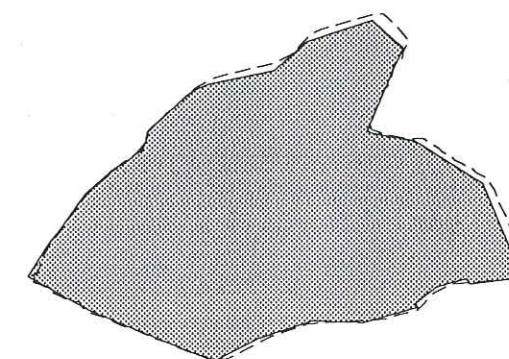
Il existe donc une disparité non-négligeable (environ un ordre de grandeur) entre la superficie de la surface dépliée et celle de la surface débasculée (figure V.29).

Figure V.29 Analyse des variations de surface au cours de la restauration d'un même bloc construit à partir des modèles PLAN et FLEXURÉ.

Modèle PLAN



Modèle FLEXURÉ

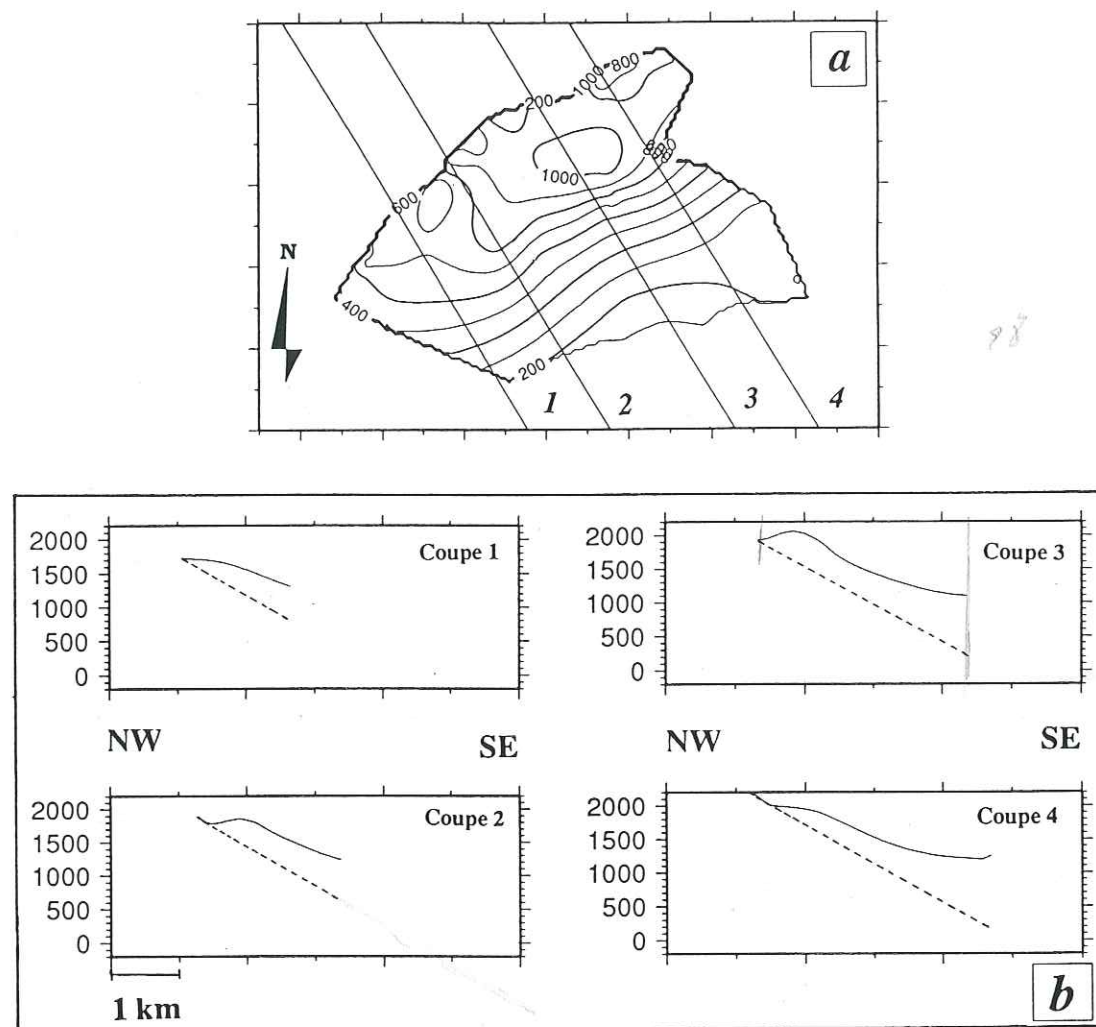


--- Contour du bloc après restauration
 [hachures] Surface initiale

Les tests réalisés précédemment sur la validité des méthodes de restauration montrent qu'elles ne sont pas en cause dans les variations de surface obtenues. Ceci est également confirmé par l'analyse du raccourcissement lié au plissement de la surface. Quatre coupes sérieées sont construites perpendiculairement aux courbes de niveaux sur la surface flexurée (programmes *creatsection.c* et *GMT-grdtrack*) (figure V.30a). La longueur de chaque coupe est mesurée à l'aide d'un curvimètre, et comparée à longueur de la projection de cette coupe sur un plan horizontal. La valeur moyenne du raccourcissement est de 3,77%, du même ordre de grandeur que la variation de surface donnée par UNFOLD. D'autre part, la visualisation en courbes de niveaux ou en perspective, de la surface flexurée avant dépliage (figure V.28) ne met pas en évidence d'erreurs grossières lors de l'interpolation.

La comparaison entre la coupe tracée sur le modèle flexuré et celle tracée sur le modèle plan (figure V.30b) illustre clairement le problème de l'utilisation d'un seul marqueur (N66-37SE sur cet exemple) pour modéliser la surface déformée. De plus, il faut noter que les pendages mesurés sur le terrain (N63-21SE, N72-16SE, ou N56-30S) sont plus faibles que le pendage affecté au bloc. Il semble donc que le marqueur utilisé pour construire le modèle plan ne soit pas représentatif de l'ensemble du bloc basculé.

Figure V.30 a- Localisation des coupes sériees sur le bloc 202 et des mesures de terrain sur ce bloc; b- Comparaison en coupe du modèle plan et du modèle flexuré. Le modèle plan est figuré en traits pointillés.



Ces remarques montrent que les différences dans les résultats ne sont pas inhérentes aux méthodes de restauration. Les variations de superficie entre les surfaces dépliées ou débasculées s'expliquent plutôt par la non-applicabilité du modèle plan au problème géologique posé (mauvaise interpolation des données, ou mauvais dessin des blocs). Il est évident que ce modèle ne peut s'appliquer à un système de blocs basculés que s'ils sont presque plans, ou si la flexure qu'ils présentent est faible comparativement à leur taille. Ceci n'est pas le cas du bloc traité ici, ni de la plupart des blocs du secteur de Ba'tays, à la différence des blocs basculés du secteur de Umm Shatt. Par la suite, ce modèle ne sera plus utilisé pour le secteur de Ba'tays.

V.3.4 Ajustement des blocs restaurés

3.4.1 Principe

Quelque soit le modèle choisi, le résultat de la restauration des structures déformées correspond à une série de blocs dépliés ou débasculés. Ces blocs constituent tous des fragments de la zone déformée. Afin de reconstituer l'état ante-déformation de cette zone, et dans l'hypothèse où celle-ci était initialement homogène, les différents blocs sont ajustés les uns par rapport aux autres, en minimisant les vides et les recouvrements éventuels.

Pour réaliser cette étape, il est nécessaire de définir le mode d'ajustement des blocs dépliés ou débasculés, le référentiel utilisé pour ajuster ces blocs entre eux, et les critères à retenir pour considérer l'ajustement comme valable.

Les travaux réalisés sur le sujet traitent l'ajustement des blocs soit de façon automatique [Audibert, 1990; Rouby et al, 1993] soit de façon manuelle [Oertel et Ernst, 1978; Gratier, 1988; Gratier et al, 1989; Guillier, 1991; Gratier et Guillier, 1993]. Au cours de cette étude, les ajustements entre les blocs sont réalisés de façon manuelle. Ce mode d'ajustement est privilégié pour les raisons suivantes :

- l'ajustement automatique est très efficace lorsque la déformation aux limites des blocs c'est-à-dire la géométrie de la faille (et donc celle du contour des blocs) est bien contrainte. Ceci n'est pas respecté sur la totalité des blocs décrits dans chaque secteur étudié. Une méthode manuelle permet de contrôler l'ajustement à partir des données de terrain ou du dessin des blocs sur les images, en particulier dans les zones où les données sont bien décrites.
- l'ajustement manuel permet également de prendre en compte les imprécisions induites par la méthode d'acquisition et de traitement des données. Dans le cas de données sismiques par exemple, la longueur des couches près des failles est sous-estimée par un effet d'ombre lié au bloc supérieur [Gratier et Guillier, 1993]. A partir des images satellitaires, le tracé des failles possède également des imprécisions (paragraphe V.1.2). L'ajustement manuel offre alors la possibilité de ne pas toujours tenir compte de l'équilibre entre vides et recouvrements qui constitue un des postulats de base des méthodes automatiques [Audibert, 1990; Rouby et al, 1993].

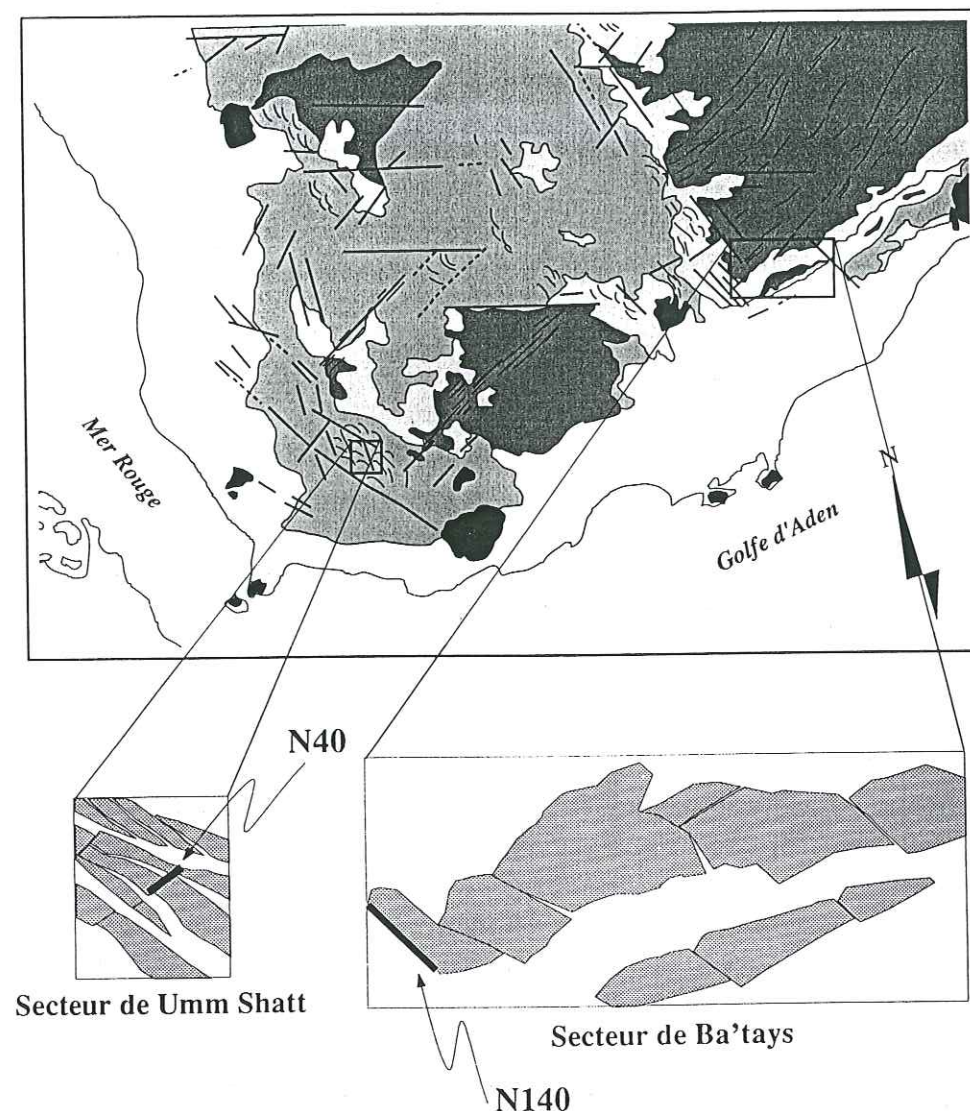
L'ajustement manuel est réalisé à partir des coordonnées des blocs, formatées à l'aide du programme *gmt2island.c* afin d'être importées dans le logiciel IslandDraw (manipulation d'objets vectoriels). Chaque bloc est ensuite ajusté par une succession d'essais, de façon interactive, directement à l'écran de la station de travail. Lors de l'ajustement manuel des blocs, les contours sont parfois modifiés pour minimiser les vides et/ou les recouvrements. Ces modifications interviennent sur les contours des blocs déformés, ce qui oblige un retour aux données initiales. La procédure complète de modélisation puis dépliage (ou débasculement) est alors reprise dans son ensemble. Ceci permet une correction interactive de la forme des blocs (avec retour systématique aux données) plus aisée qu'avec un ajustement automatique.

La restauration des structures déformées et plus particulièrement l'ajustement des blocs entre eux ont pour but de reconstituer la surface initiale, c'est-à-dire de "refermer" les failles. Il existe une infinité de solutions possibles pour l'ajustement des contours des blocs les uns par rapport aux autres. La configuration des blocs dans l'état déformé limite un peu le nombre de ces solutions (forme des blocs), mais des contraintes plus strictes pour l'ajustement de ces blocs sont nécessaires (données de terrain, critères de décalage sur les images ...). Une façon de réduire le nombre de solutions possibles est aussi d'utiliser les trajectoires selon lesquelles s'effectuent soit le dépliage, soit le débasculement des surfaces déformées (déplacements associés à la déformation continue). De plus, la comparaison entre état initial (restauré) et état final (déformé) nécessite de connaître (ou de définir) un référentiel fixe au cours de la déformation. Les travaux concernant l'ajustement de blocs utilisent pour la plupart une ligne fixe pour référentiel [Cobbold et Percevault, 1983; Gratier et al, 1989; Gratier et al, 1991; Guillier, 1991].

Enfin, les critères permettant de définir l'ajustement comme valable ne sont que subjectifs (à la différence d'une méthode numérique avec test de la convergence du programme [Rouby et al, 1993] par exemple), mais peuvent eux-aussi être contraints par l'utilisation de données externes au modèle (terrain, images, coupes).

3.4.2 Détermination d'un référentiel fixe

Figure V.31 Référentiels fixes choisis pour l'ajustement des blocs des secteurs de Umm Shatt et de Ba'tays. Le rapport de taille entre les deux secteurs d'étude est respecté.



Secteur de Umm Shatt

L'étude structurale a montré que le système de blocs basculés est limité par des accidents décrochants orientés N50. D'un point de vue chronologique, le jeu de ces accidents est antérieur à la formation des failles normales limitant les blocs (chapitre 3). La situation de la zone étudiée ne permet pas d'utiliser directement un de ces grands accidents N50 comme référentiel. C'est donc le décrochement orienté N50, situé entre les blocs 5, 9-6,7,10 (figure V.4) et probablement contemporain du jeu décrochant sur les grands accidents N50 qui est choisi comme référentiel pour cette zone déformée (figure V.31).

Secteur de Ba'tays

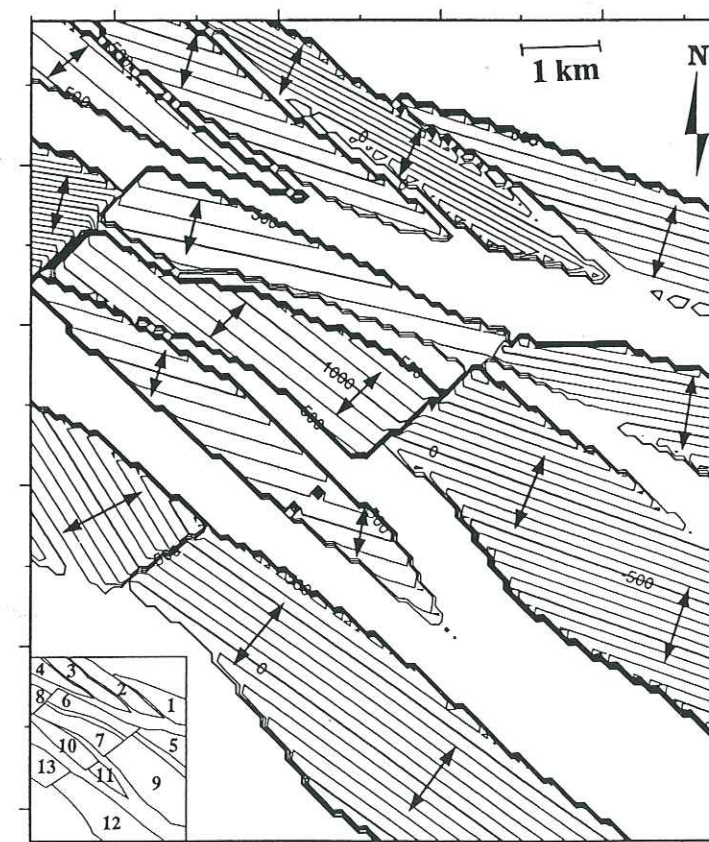
Ce secteur occupe une position particulière sur la marge sud-yéménite, à l'est du fossé N140 qui la découpe (chapitre 3). Les failles bordières de ce fossé sont visibles dans la partie ouest de

ce secteur. Ce sont elles qui sont choisies comme référentiel. Ce choix est discutable puisque la chronologie entre les déformations affectant le fossé et celles affectant le secteur étudié est mal connue. Cependant, les images satellitaires montrent que les surfaces structurales qui affleurent sur l'ensemble du secteur sont fréquemment découpées par des failles N140. D'autre part, les données de microtectonique récoltées à proximité de ces failles n'indiquent jamais de jeux décrochants postérieurs aux phases d'extension déterminées à partir des failles normales N70 à N 100. La seule évidence contraire à cette chronologie est l'existence d'un comportement différent des séries de Jurassique supérieur et du Jurassique inférieur (figure III.16). En effet, le décollement de la série Tithonique sur les niveaux gypseux et marneux du Kimméridgien qui provoque la formation de failles normales N120 à N140 dans la partie ouest du secteur de Ba'tays, est associé à un jeu synchrone ou postérieur des accidents N140 (figure III.14). Malgré ces remarques, le référentiel choisi pour ce secteur est une ligne orientée N140, située sur le bloc 1, et qui correspond à un accident majeur limitant le fossé N140 qui découpe la marge sud du Yémen (figure V.31).

3.4.3 Tracé des trajectoires de dépliage ou de débasculement

Pour le débasculement des surfaces planes, les trajectoires de déplacements sont parallèles à la ligne de plus grande pente déduite du pendage affecté à chaque surface (figure V.32).

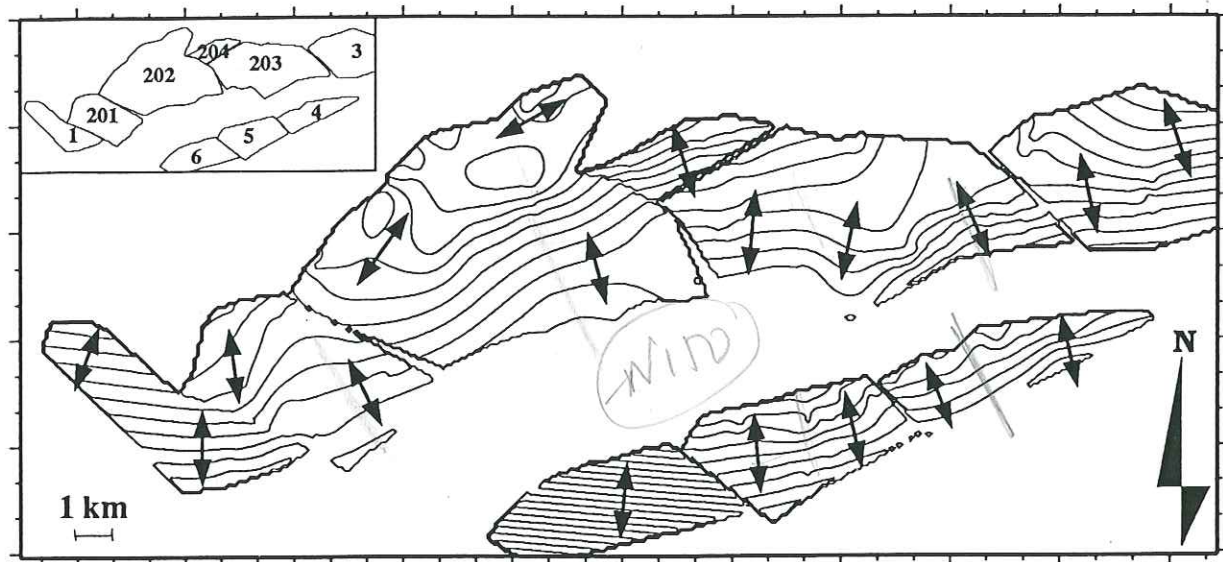
Figure V.32 Trajectoires de déplacement associées au débasculement de chaque bloc pour le modèle PLAN (secteur de Umm Shatt). L'équidistance des courbes de niveaux est de 100 m.



Pour le dépliage, les trajectoires correspondent à la projection sur un plan horizontal des vecteurs joignant les coordonnées XY du contour de la surface initiale flexurée, à celles de la surface dépliée. Le programme UNFOLD fournit un fichier comportant la triangulation réalisée sur la surface initiale flexurée, ainsi qu'un fichier contenant les coordonnées XY du contour des

blocs après dépliage. Les programmes *init2cont.c* et *cont2clean.c* permettent d'isoler les points de contour de la surface initiale discrétisée en triangles, et de représenter les trajectoires obtenues pour la surface dépliée. Ces trajectoires sont ensuite reportées sur la cartographie de l'ensemble de la zone déformée, sur la figure V.33. La variation des trajectoires à l'intérieur d'une même surface (bloc 202 par exemple) traduit probablement le fait que la cartographie du bloc basculé sur les images peut être améliorée (découpage en plusieurs blocs par exemple).

Figure V.33 Trajectoires de déplacement associées au dépliage de chaque bloc du secteur de Ba'tays. L'équidistance des courbes de niveaux est de 100 m.

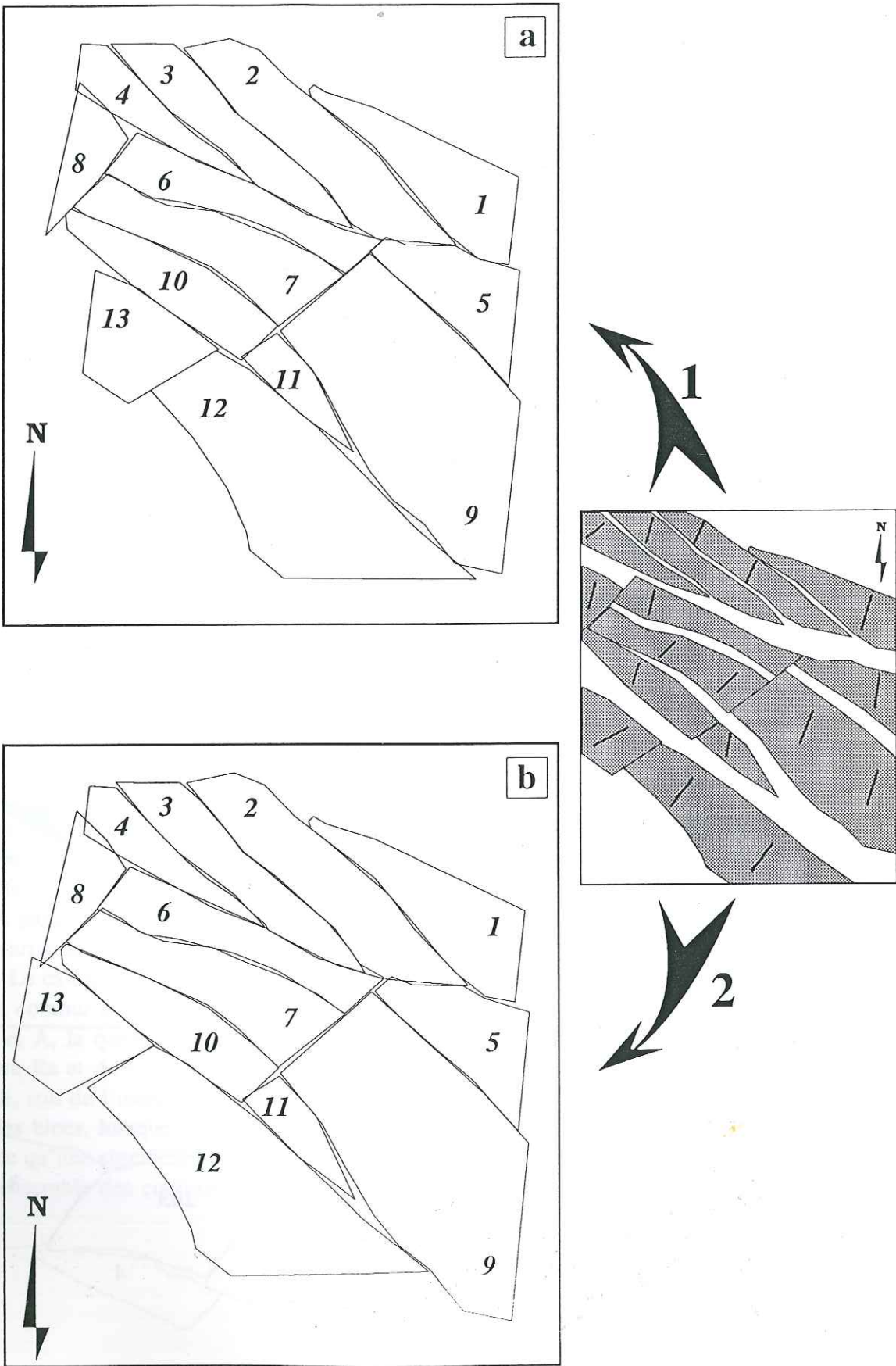


3.4.4 Ajustement des blocs

Pour chaque secteur analysé, deux ajustements sont présentés. L'un d'entre eux correspond à un ajustement des blocs en tenant compte des seules trajectoires de dépliage ou de débasculement. Le second utilise principalement la forme des blocs, pour minimiser au mieux les vides et les recouvrements.

La figure V.34 illustre ces ajustements réalisés pour le secteur de Umm Shatt, en tenant compte également du référentiel fixe choisi (accident N50). Les différences entre les deux ajustements sont faibles pour les blocs 1 à 9. La différence principale concerne les blocs 12 et 13. Pour le cas 2 de la figure V.34 (ajustement selon la forme des blocs), la solution choisie consiste à fermer la faille entre les blocs 10,13 et 11,12. L'ajustement réalisé est alors fortement guidé par la forme des blocs.

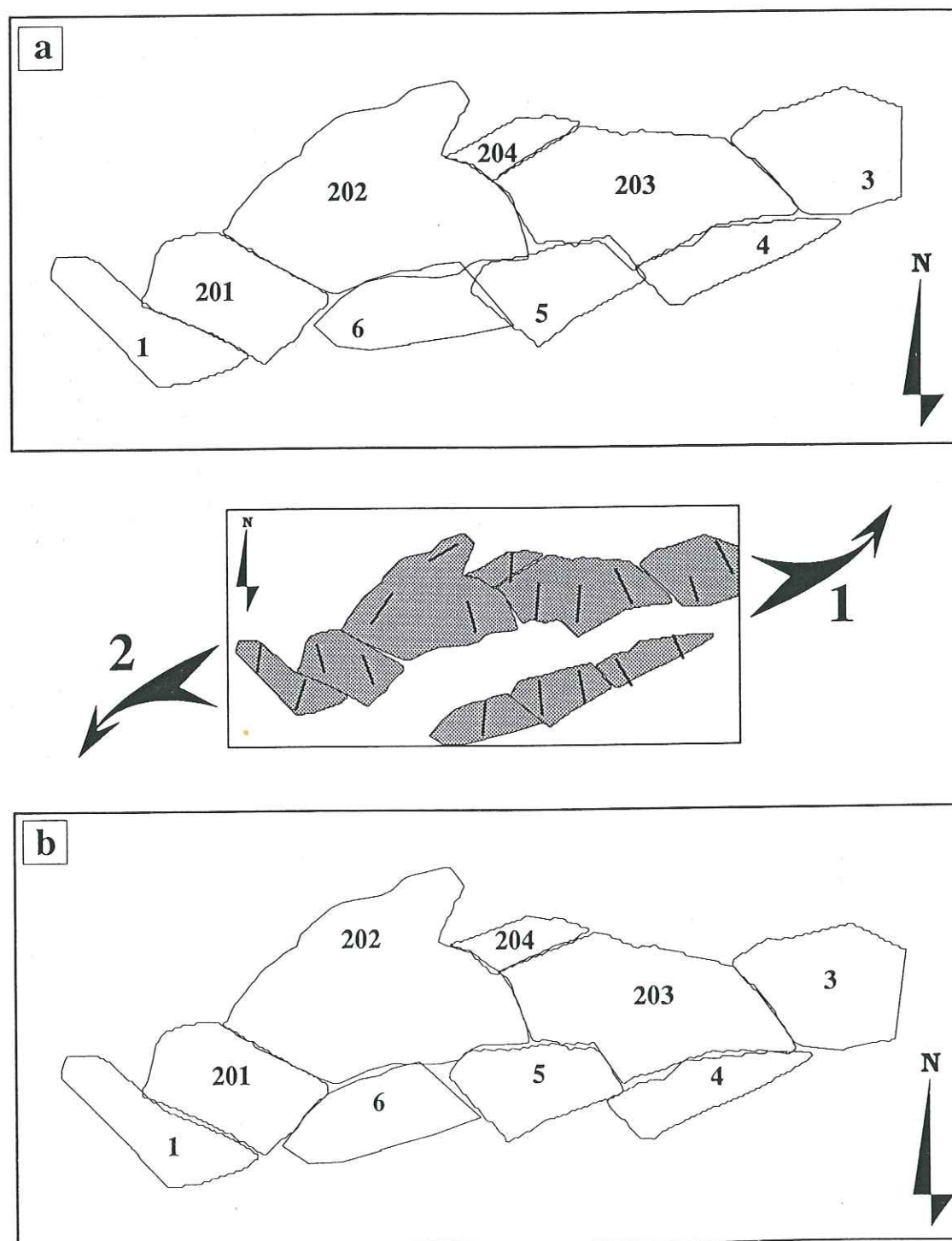
Figure V.34 Ajustement des blocs du secteur de Umm Shatt. a- Ajustement réalisé à l'aide des trajectoires de débasculement; b- Ajustement réalisé à partir de la forme des blocs.



La figure V.35 visualise le résultat de l'ajustement des blocs dépliés dans le secteur de Ba'tays. La différence entre les deux ajustements concerne essentiellement la position des blocs 4,5 et 6 par rapport aux blocs plus au Nord. L'ajustement en fonction des trajectoires de dépliage implique un recouvrement important des blocs 5 et 6.

Dans ce secteur, les blocs sont séparés par des décrochements d'orientation moyenne N140 qui permettent peu de déplacement des blocs les uns par rapport aux autres. Par contre, entre les blocs 4,5,6 et les autres, il existe une zone de failles normales qui limitent les blocs basculés et sur laquelle les contraintes pour l'ajustement sont très faibles. Ceci a pour effet d'augmenter le nombre de solutions possibles pour réaliser cet ajustement, et donc de diminuer sa validité dans ce secteur.

Figure V.35 Ajustement des blocs dépliés du secteur de Ba'tays. a- Ajustement des blocs à partir des trajectoires de dépliage; b- Ajustement selon la forme des blocs.



V.4 Quantification de l'extension

V.4.1 Principe de calcul et limites

Les données disponibles pour la quantification de l'extension sont :

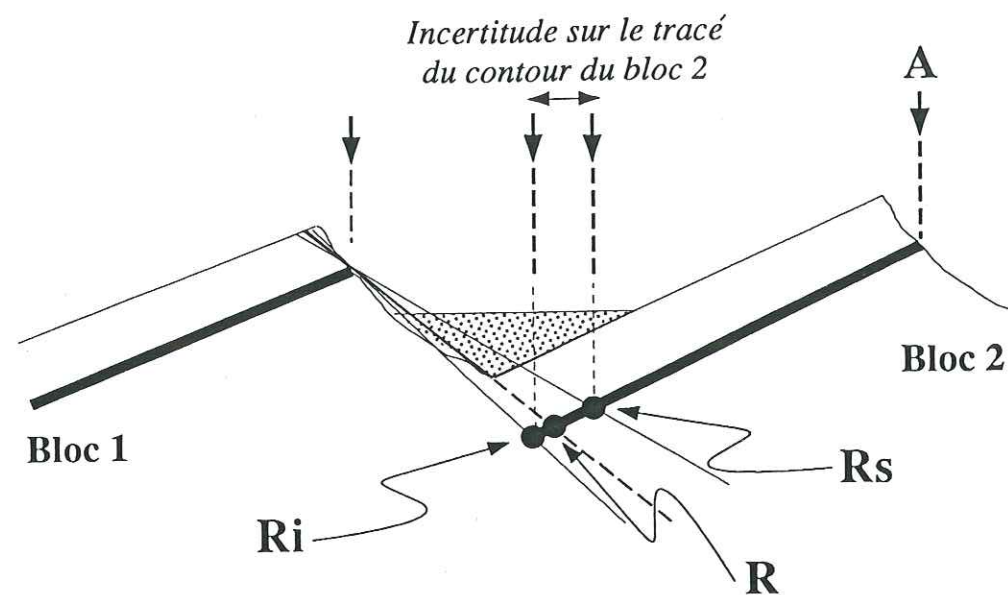
- les coordonnées XY des points du contour de la zone déformée projetée sur un plan horizontal (état final),
- les coordonnées XY du contour de la même zone dans son état initial, non-déformée.

La méthode utilisée consiste à calculer la variation de surface entre l'image binaire (pixels noirs et pixels blancs) de la zone déformée et celle de la zone restaurée. Les images sont construites en affectant des pixels noirs (niveau de gris à 0) à l'intérieur du polygone décrit par le contour de chaque bloc, et des pixels blancs (niveau de gris à 255) à l'extérieur de ce même polygone. Sur chacune des images ainsi obtenues, le nombre de pixels noirs est déterminé à partir des histogrammes de répartition des pixels. La différence entre le nombre de pixels noirs des deux images (état déformé et état restauré-ajusté) est alors exprimée en terme de variation de surface.

La réalisation de l'image binaire pour chacun des deux états doit être faite strictement à la même résolution. Le nombre total de pixels doit être égal d'une image à l'autre pour permettre la comparaison par rapport à un état de référence commun. La résolution utilisée pour chacune des images binaires est de 80 dpi (dot per inch) ce qui revient à placer 80 pixels sur 1 inch (2,54 cm environ). Chaque image est constituée de 935 lignes de 661 pixels. Les mesures de variations de surface, exprimées à partir du comptage de pixels dans une image, ont une signification, en absolu, compte-tenu de la résolution utilisée pour construire l'image. Cependant, la résolution choisie pour découper chacune des images en pixels n'influe pas sur la variation de surface puisque celle-ci est exprimée de façon relative. Une résolution très fine (300 dpi par exemple) permettra seulement d'approcher avec plus de précision la superficie réelle de la surface analysée.

La modélisation de la zone déformée a montré qu'un des maillons importants dans la chaîne de traitement permettant de quantifier l'extension, est la cartographie des contours des blocs sur l'image. En effet, des fluctuations locales sur les contours entraînent des variations de la quantité d'extension. A partir des coupes présentées sur la figure V.3 (paragraphe V.1.2), il est possible d'estimer les variations de longueur induites par une erreur dans le dessin du contour des blocs (figure V.36). Le calcul de l'extension pour le marqueur géologique en noir sur la figure V.36, réalisé avec le contour du bloc 2 situé entre R et A donne 18,2%. Pour le contour du même bloc entre Ri et A, la quantité d'extension est de 15,9%. Elle est de 24,8% avec un contour positionné entre Rs et A. Ceci implique donc une incertitude dans le calcul de l'extension de $(24,8 - 15,9)\%$, soit de l'ordre de 5%. Cependant, cette incertitude n'existe que localement sur les contours des blocs, lorsque le remplissage sédimentaire est présent. La valeur d'incertitude de 5% n'a donc qu'une signification locale. Elle correspond à une sur-estimation de l'incertitude rapportée à l'ensemble des contours des blocs de la zone déformée.

Figure V.36 Calcul de l'incertitude sur la valeur de l'extension, en fonction du contour choisi pour les blocs basculés.



V.4.2 Résultats

4.2.1 Secteur de Umm Shatt

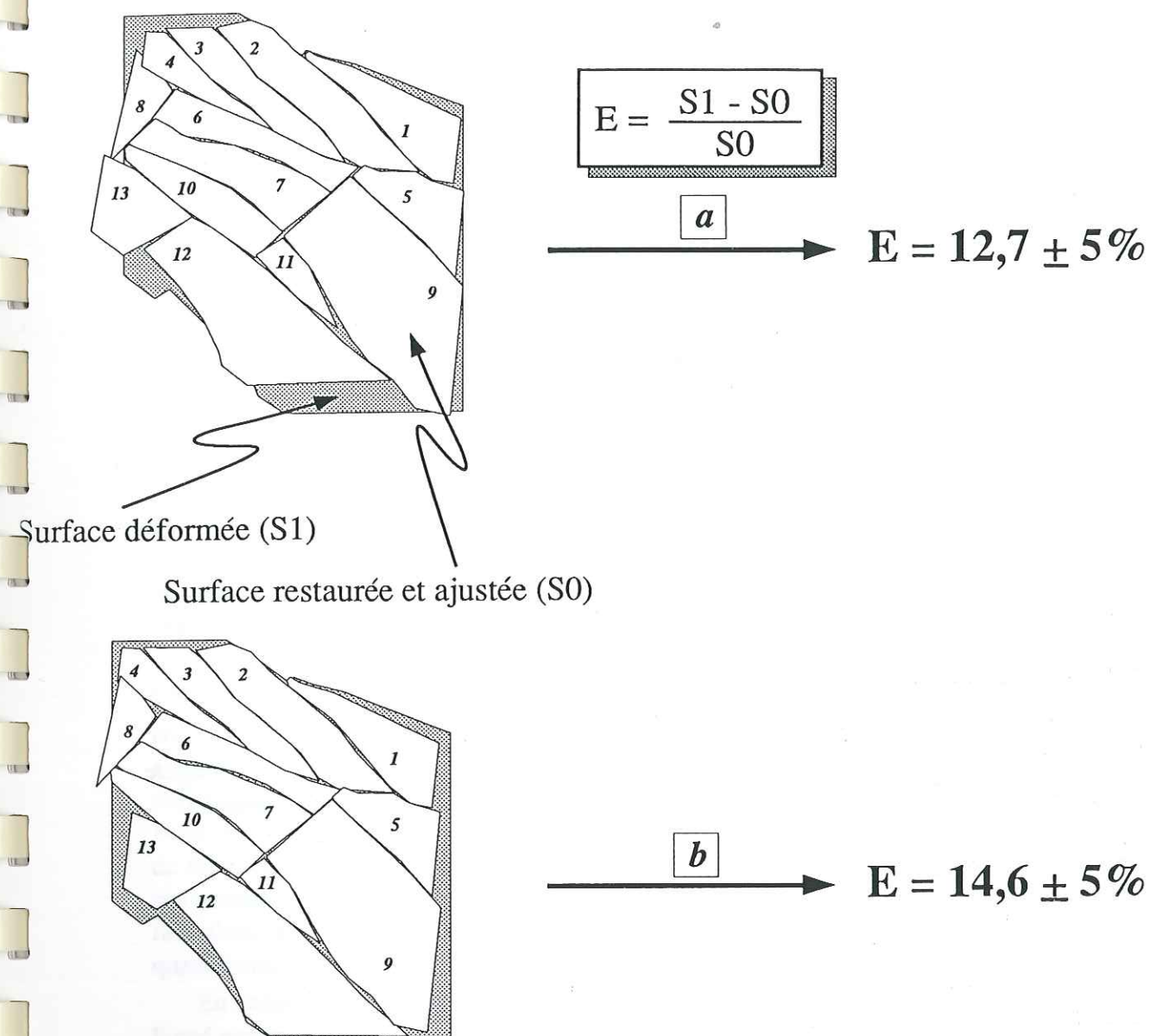
Le dessin du contour des blocs est correct, comme l'ont montré l'analyse des pendages des failles du modèle (paragraphe V.2.3) et les observations de terrain. Le calcul de l'extension est réalisé pour chacun des ajustements précédemment définis (figure V.37).

La quantité d'extension obtenue pour les blocs ajustés selon leur forme (figure V.34b) est de $12,7\% \pm 5\%$. L'ajustement des blocs selon les trajectoires de débasculement (figure V.34a) conduit, pour le même dessin du contour des blocs, à une quantité d'extension de $14,6\% \pm 5\%$.

La variation dans la quantité d'extension obtenue à partir d'ajustements différents des mêmes blocs permet de quantifier l'écart entre ces deux ajustements. L'ajustement selon la forme des blocs minimise de façon plus importante les vides éventuels entre les blocs.

Pour le dessin des contours de blocs retenu, pour le référentiel choisi au cours de l'ajustement des blocs, et en fonction du modèle de blocs basculés utilisé, l'extension dans ce secteur de la marge sud du Yémen est donc de l'ordre de 15%.

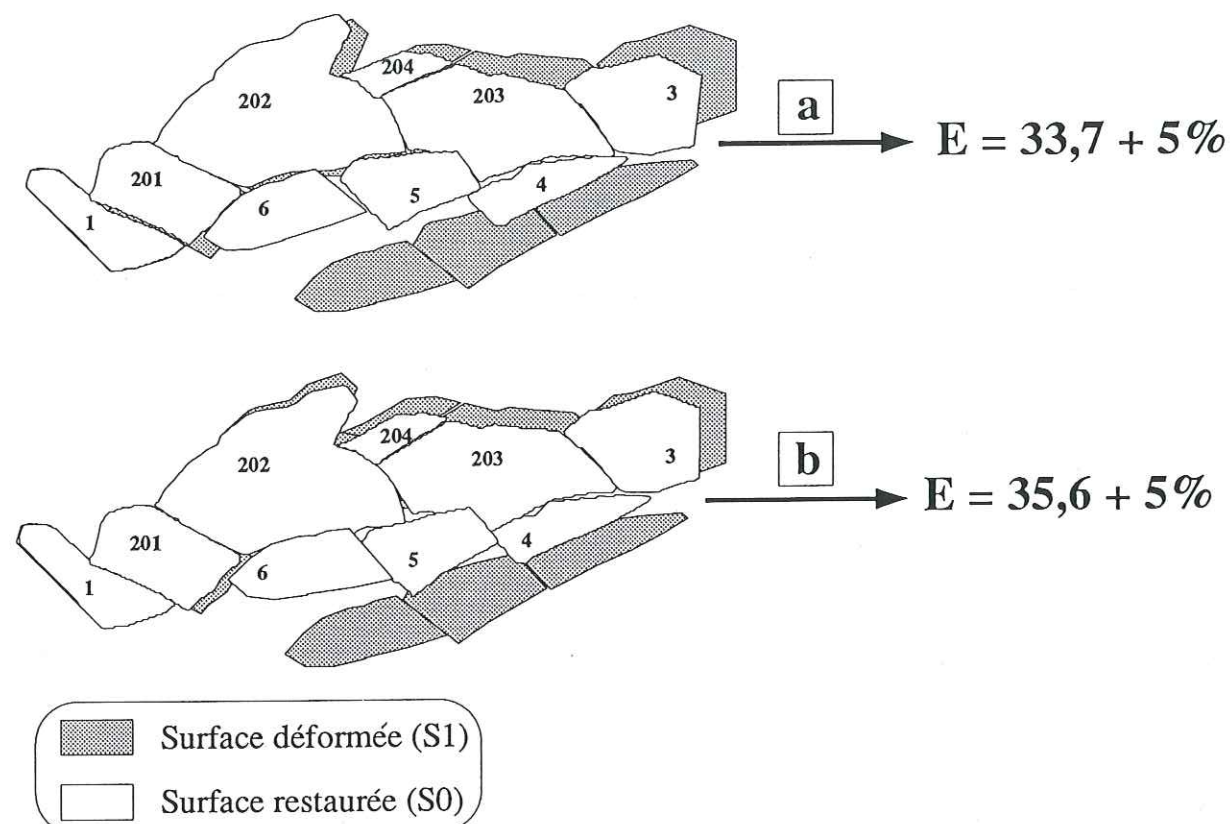
Figure V.37 Résultats du calcul de l'extension dans le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement réalisé selon la forme des blocs; b- Ajustement réalisé selon les trajectoires de débasculement.



4.2.2 Secteur Bat'ays

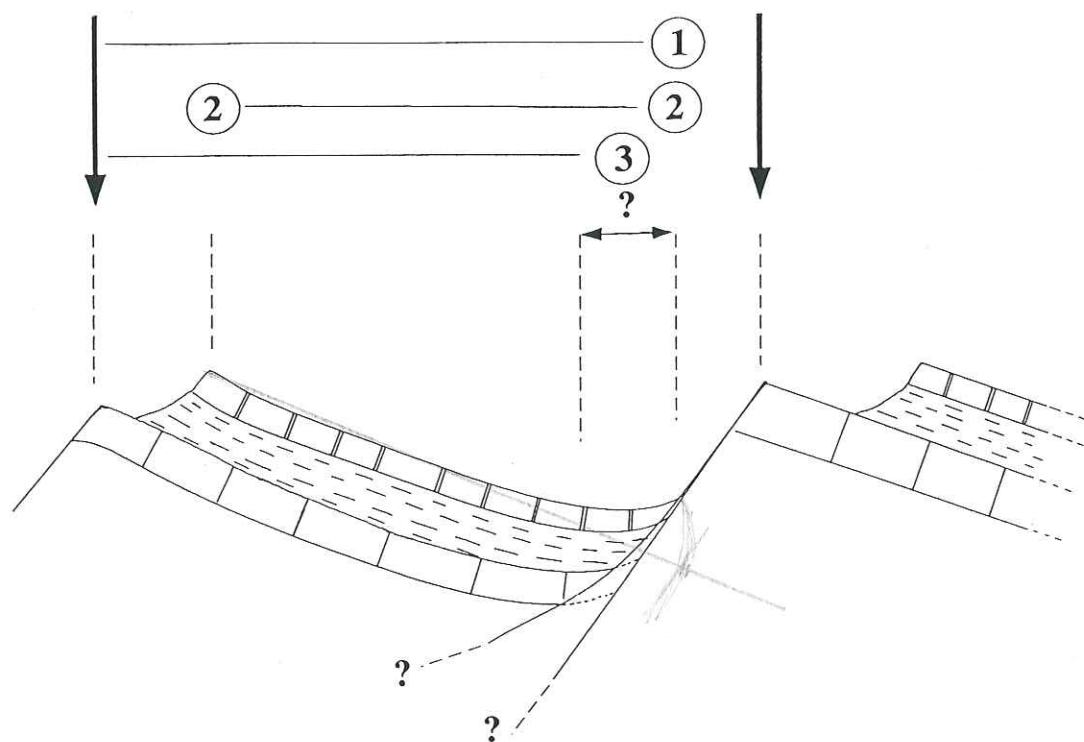
Les difficultés liées au dessin du contour des blocs restent les mêmes que celles rencontrées dans le secteur d'Umm Shatt. En effet, l'horizon-repère choisi pour ce secteur n'affleure pas à l'arrière des blocs, du fait de sa position dans la colonne stratigraphique. Localement (Nord-Ouest de Ba'tays, entre les blocs 4 et 203), l'analyse structurale sur le terrain indique la présence de brèches de faille, ce qui permet de déterminer le tracé exact de la faille. Par contre, dans d'autres secteurs situés au bas des blocs, le tracé des failles est mal défini (chapitre 3, figure III.14b). Le calcul de l'extension avec le modèle flexuré donne une valeur d'extension de $33,7\% \pm 5\%$, dans le cas d'un ajustement des blocs selon leur forme (figure V.35a). Pour l'ajustement tenant compte des trajectoires de dépliage, l'extension est de $35,6\% \pm 5\%$ (figure V.35a). La différence entre les quantités d'extension obtenue selon les deux ajustements est du même ordre que pour le secteur de Umm Shatt.

Figure V.38 Résultats du calcul de l'extension dans le secteur de Ba'tays. a- Ajustement réalisé selon la forme des blocs b- Ajustement réalisé selon les trajectoires de dépliage.



Dans le cas du modèle flexuré, le dessin des contours des blocs (configuration 1 sur la figure V.39) conduit à une valeur d'extension qui constitue une limite inférieure dans l'estimation.

Figure V.39 Erreurs associées au dessin des blocs dans le secteur de Ba'tays.



En effet, la géométrie de la faille en profondeur est inconnue. Le dessin du contour des blocs réalisé pour la configuration 3 (figure V.39) peut permettre de calculer une valeur d'extension plus réaliste, mais supérieure aux valeurs obtenues. La réalisation de ce dessin est difficile puisque la géométrie du marqueur géologique choisi dans le Jurassique inférieur n'est pas connue à proximité de la faille.

Pour le calcul de l'extension à partir d'un dessin réalisé selon la configuration 2 (figure V.39), le marqueur géologique nécessaire doit être pris dans les séries du Jurassique supérieur. Ces séries sont particulièrement mal représentées dans les blocs 4,5, et 6 (érosion, recouvrement des séries par des sédiments récents) et la réalisation de ce dessin n'est pas possible.

La quantité d'extension dans le secteur de Ba'tays est probablement de l'ordre de 35%, mais reste soumise à discussion, compte-tenu des incertitudes sur le tracé des blocs et des failles.

V.4.3 Discussion

Les calculs de l'extension réalisés sur chacun des secteurs sont fortement dépendants des étapes précédentes permettant de modéliser la zone déformée et de restaurer celle-ci dans son état initial de non-déformation. Cependant, les erreurs ou les incertitudes liées à chacune de ces étapes sont bien identifiées et ont été évitées ou minimisées.

Dans le secteur de Umm Shatt, le modèle plan utilisé conduit à proposer une gamme de variations plausibles pour la quantité d'extension et d'estimer de façon réaliste sa valeur autour de 15%. Ce modèle plan s'applique bien aux données disponibles sur ce secteur et conduit à des résultats cohérents. Cependant, il ne tient pas compte de la déformation interne des blocs (dykes notamment).

Dans le secteur de Ba'tays, le modèle plan n'est pas en adéquation avec les données. L'utilisation d'un modèle flexuré prend en compte les variations de pendage au dos des blocs et correspond mieux aux données. Cependant, la cartographie du contour des blocs dans ce secteur est beaucoup plus discutable. La trace cartographique des failles n'est pas toujours clairement définie sur les images (chapitre 3). Lorsque c'est le cas (Nord-Ouest de Ba'tays, pour la limite Nord du bloc 4 par exemple), la géométrie des structures sur le terrain indique des pendages de faille assez fort (45° environ). Si les failles s'initient à 60° (valeur communément admise), ces pendages ne sont pas compatibles avec le basculement des blocs basculés (30 à 40°). Il faut alors faire l'hypothèse d'un basculement anté-fracturation par exemple, rendant difficile la quantification de l'extension.

En carte, le vide laissé entre deux blocs par un décrochement est étroit, par rapport à celui laissé par une faille normale. Ainsi, le calcul de l'extension dans le secteur de Ba'tays s'effectue quasi exclusivement sur la faille normale séparant les blocs 4,5,6 des autres. Ce calcul de l'extension sur une seule structure n'est pas très réaliste. De plus, la géométrie des failles en profondeur ou la géométrie des blocs basculés à proximité de ces failles ne sont pas connues avec précision. Ceci empêche par exemple, de dessiner correctement le contour des blocs basculés dans le cas de l'utilisation d'un marqueur géologique pris dans le Jurassique inférieur (figure V.39).

Compte tenu de ces remarques, l'estimation de la quantité d'extension réalisée dans le secteur de Ba'tays ne constitue qu'une approximation grossière correspondant probablement à une sur-estimation et qu'il est nécessaire d'affiner.

V.5 Analyse des déplacements associés à l'extension

L'analyse de la déformation extensive présentée jusqu'ici est essentiellement géométrique. La reconstitution de l'état ante-déformation des zones déformées permet d'envisager une approche cinématique de la déformation, en terme de déplacements finis et non de déformation progressive. Cette étude consiste à construire les champs de déplacements associés à l'extension, entre l'état actuel de la zone déformée, et l'état ante-déformation de cette même zone.

Les secteurs analysés sur la marge sud du Yémen comportent des zones à déformation continue (les blocs basculés et flexurés) séparés les uns des autres par des discontinuités (les failles qui séparent ces blocs). Chaque bloc est considéré comme un élément indépendant dans lequel la déformation est homogène et continue (basculement ou flexuration). A l'échelle de l'ensemble des blocs, la surface étudiée représente une zone déformée de façon hétérogène. L'analyse des déplacements présente alors deux aspects [Ramsay et Huber, 1983] :

- l'analyse des déplacements locaux, associés au dépliage et/ou au débasculement de chacun des blocs (déplacements associés à la déformation homogène de chaque bloc),
- l'analyse des champs de déplacements sur l'ensemble de la zone déformée constituée de la juxtaposition de tous les blocs (déplacements relatifs associés à l'ensemble de la déformation)

Le tracé des trajectoires de déplacements associés à la restauration de chaque bloc (déplacements locaux) renseigne sur la déformation homogène. Il permet surtout de contraindre l'ajustement de ces blocs entre eux, pour reconstituer l'état initial de la zone déformée (paragraphe V.3.4). La qualité de cet ajustement conditionne ensuite le tracé des déplacements sur l'ensemble de la zone et leur interprétation. Ce tracé de ces déplacements est abordé de deux façons :

- une analyse en deux dimension (2D) qui correspond à la cartographie des vecteurs de déplacements par comparaison entre état initial et état final, pour l'ensemble de la zone déformée,
- une analyse en trois dimensions (3D), des vecteurs de déplacements qui permet ensuite, par projection des vecteurs sur les failles qui séparent les blocs basculés, de calculer des stries théoriques associées.

V.5.1 Champs de déplacements 2D

5.1.1 Principe de détermination

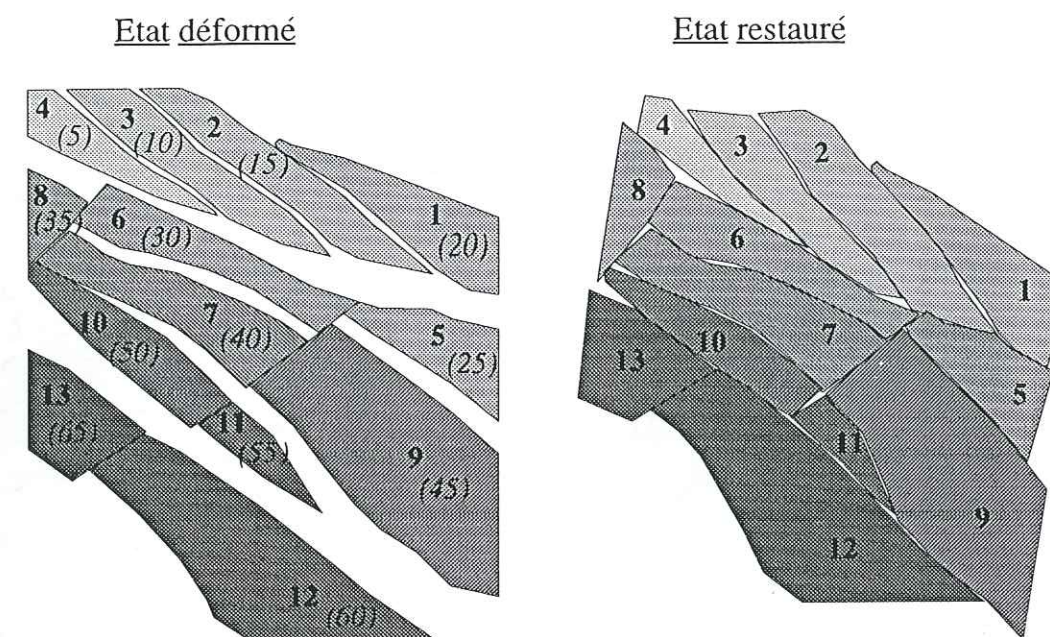
Les contours des blocs sont représentés par les coordonnées XY des points qui les composent dans l'état final, et par les coordonnées XY de ces mêmes points, recalculées pour obtenir l'état initial. La détermination des déplacements à partir des contours de chaque bloc correspond au traitement de la zone déformée de façon hétérogène, par une analyse des déplacements aux limites des blocs déformés. Ceci correspond à la décomposition de la déformation hétérogène en domaines homogènes pour lesquels les compatibilités aux limites sont discutées [Cobbold, 1979; Cobbold et Percevault, 1983; Gratier et al, 1989].

Les déplacements 2D sont obtenus par projection des vecteurs de déplacements sur le plan horizontal. Ces vecteurs sont tracés entre l'état initial et l'état final, pour chaque bloc de la zone déformée, ce qui nécessite une procédure spéciale permettant d'exprimer les coordonnées des contours de blocs dans un repère commun. De plus, les différents blocs sont ajustés les uns par rapport aux autres, en fonction d'un référentiel dont l'orientation est supposée fixe au cours de la déformation. Le tracé des déplacements 2D ne sera correct que si l'origine du repère choisi pour les deux configurations (état initial et état final) est le même, c'est-à-dire si les deux

configuration sont superposées exactement au niveau du référentiel considéré comme fixe. La procédure mise au point pour le tracé des déplacements 2D est la suivante :

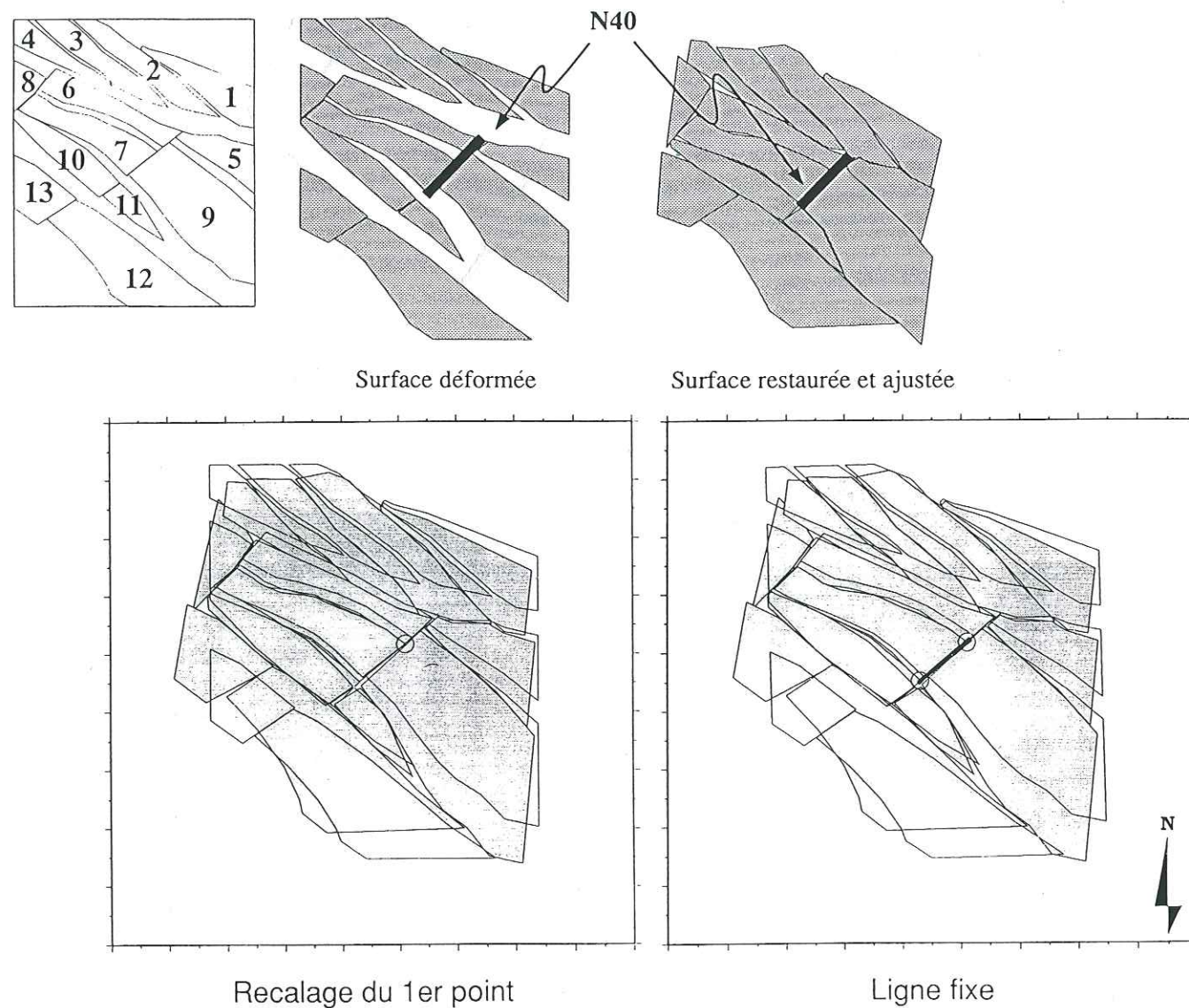
1. Repérage de chacun des blocs basculés dans l'état initial et l'état final, avec le logiciel IslandDraw, en affectant un niveau de gris à chaque bloc homologue entre les deux configurations (figure V.40).

Figure V.40 Principe de l'identification de chaque bloc dans le logiciel IslandDraw, à partir des niveaux de gris affectés à chaque bloc.



2. Transformation des données depuis IslandDraw, en un fichier de coordonnées XY pour chaque point du contour des blocs. Le calcul est effectué séparément pour chaque configuration par le programme *island2xy.c*.
3. Superposition des deux configurations en tenant compte du référentiel choisi. Pour les deux secteurs (Umm Shatt ou Ba'tays), ce référentiel est un segment de droite défini par ses points extrêmes et qui appartient à l'un des blocs basculés. Le recalage s'effectue donc en premier, par une translation d'une des deux configurations par rapport à l'autre, selon un point de ce segment, puis par une rotation autour de ce point jusqu'à ce que les deux lignes "références" soient parallèles (programme *superpose.c*). Ces transformations sont appliquées à l'ensemble des coordonnées XY des points des blocs basculés traités (figure V.41).
4. Tracé des vecteurs 2D (projection de ces vecteurs sur le plan horizontal), entre les coordonnées XY des points de contours se correspondant d'une configuration à l'autre (programme *formchamps.c*).

Figure V.41 Principe de la superposition des configurations initiale et finale pour le calcul des déplacements 2D sur l'ensemble de la zone déformée.



5.1.2 Interprétation des champs de déplacements 2D dans le secteur de Umm Shatt

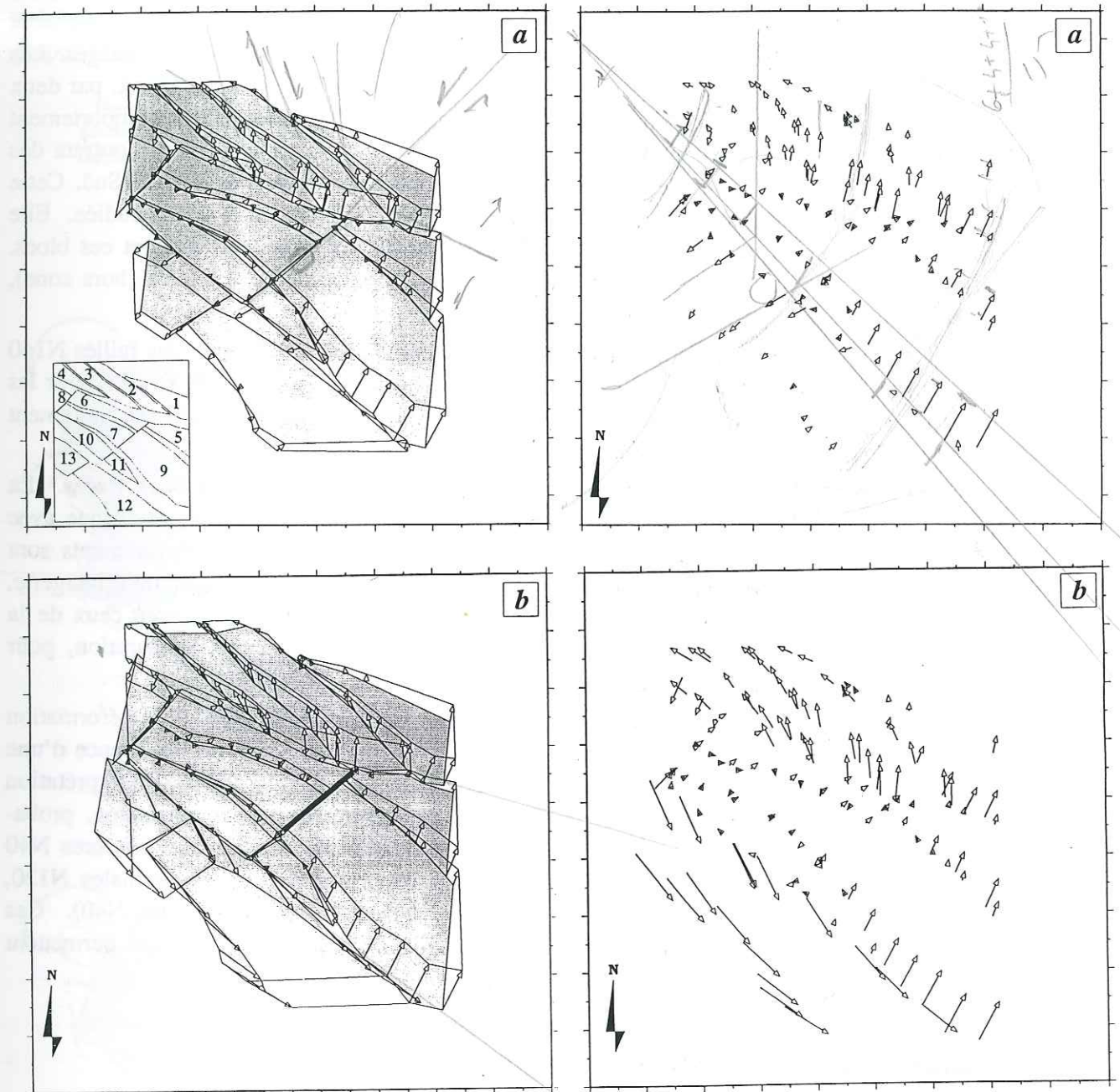
L'interprétation consiste à décomposer le champ de vecteurs obtenu en déplacements associés à des transformations plus simples (translations ou rotations) facilitant ainsi l'interprétation [Cobbold, 1979; Ramsay et Huber, 1983]. Ceci revient à rechercher les symétries ou les axes de rotation dans le tracé des déplacements 2D.

Cartographie des déplacements 2D

Le référentiel considéré comme fixe au cours de la déformation correspond à une ligne orientée N40 qui sépare les blocs 6,7 et 5,9 (figure V.42). Ce choix conditionne bien évidemment le tracé des vecteurs de déplacements, et donc l'interprétation qui en sera faite. Les données structurales sur ce secteur (chapitre 3) indiquent que ce secteur se déforme selon une logique d'extension oblique par rapport aux bordures du système (chapitre 3). Pour vérifier cette hypothèse, le référentiel doit être pris soit sur une des bordures du système, soit au centre

de ce même système déformé. Le choix de ce référentiel se justifie à postériori, puisque le référentiel est parallèle à la direction des bordures du système (failles N40). De plus, il est placé au milieu de la zone déformée (figure III.11 du chapitre 3).

Figure V.42 Champs de déplacements sur le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des seules trajectoires de débasculement; b- Ajustement réalisé selon la forme des blocs.



Le segment de droite choisi pour superposer les deux configurations est celui situé sur la limite est du bloc 7. La figure V.42 illustre la cartographie du champ 2D obtenue sur ce secteur, à partir de cette superposition. Les déplacements 2D sont tracés pour les deux ajustements réalisés entre les blocs (paragraphe V.3.4) et sont tracés depuis l'état initial jusqu'à l'état final.

La distribution générale des vecteurs sur les deux tracés réalisés est proche (figure V.42a,b). L'ensemble de la surface se décompose en trois parties. La première, la plus au nord et comprenant les blocs 1, 2, 3, 4, montre des vecteurs 2D orientés en moyenne de N0 à N310.

La seconde partie, partie centrale du secteur étudiée comportant les blocs 6, 7, 8, 9, 10 et 11, présente des vecteurs orientés N40 environ et dont les valeurs sont faibles par comparaison aux deux autres zones. La troisième zone, au sud, est constituée par les blocs 12 et 13, qui présentent des déplacements importants orientés N130 (figure V.42b), ou orientés N40 et plus faibles (figure V.42a).

Sur les deux tracés, la zone centrale présente des déplacements faibles, réguliers en direction. Ceci traduit un déplacement par translation, caractérisant le jeu normal des failles qui séparent les bloc 6, 7 et 10. Ceci est confirmé par les études de terrain et l'interprétation des images. Les blocs 6, 7, 10 et 11 de la zone centrale sont délimités latéralement à l'Est et à l'Ouest, par deux accidents N40 qui guident probablement leurs déplacements, ce qui explique leur comportement d'ensemble homogène. Dans la partie est de cette zone centrale, les blocs 9 et 5 montrent des déplacements qui varient le long des failles N120 qui les séparent des parties Nord et Sud. Cette variation est progressive depuis le décrochement N40 vers les bords de la zone étudiée. Elle s'explique probablement par une composante décrochante sur les failles qui limitent ces blocs. En effet, les données de terrain mesurées dans le prolongement du bloc 9 à l'Est (hors zone), indiquent l'existence de stries décrochantes dextres sur des plans de faille N120.

Les déplacements observés pour les blocs 1, 2, 3, 4 de la zone Nord, le long des failles N140 à N160 qui les séparent sont semblables à ceux décrits entre les blocs 5 et 9, et ceci pour les deux tracés (figure V.42a, b). Ils indiquent un jeu décrochant sur les failles qui est clairement confirmé par les stries mesurées sur le terrain.

Pour la zone Sud, l'orientation des vecteurs diffère fortement entre les deux tracés. La répartition des déplacements N130 environ, indiqués sur la figure V.42b, est symétrique avec ceux de la zone Nord, par rapport à la zone centrale. Les valeurs de ces déplacements sont beaucoup plus fortes et il est difficile de les contraindre par les données de terrain ou d'imagerie. Dans le cas du tracé de la figure V.42a, les déplacements sont compatibles avec ceux de la zone centrale. Ceci illustre l'importance de l'ajustement des blocs après restauration, pour l'interprétation des déplacements finis.

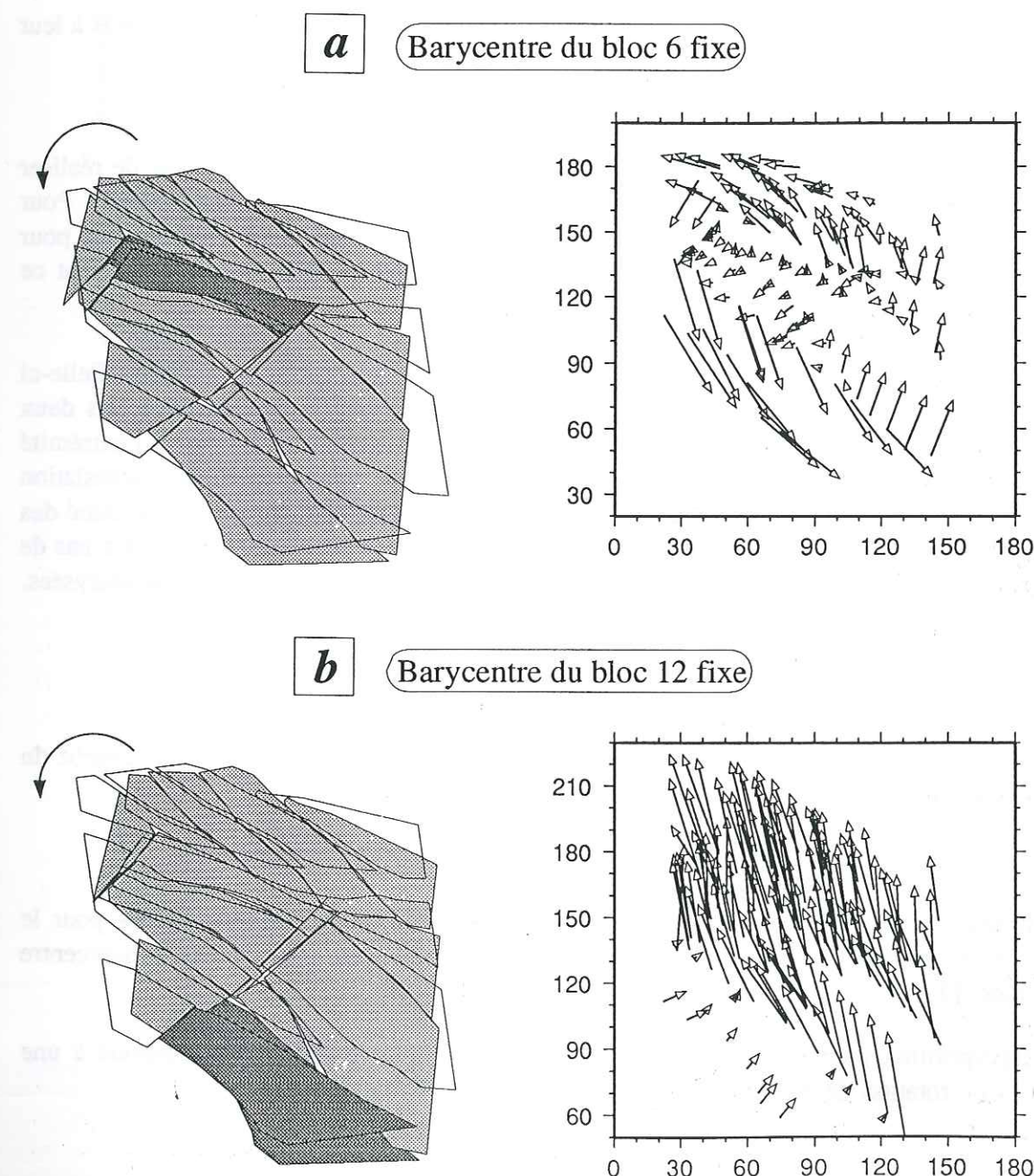
Le champ de déplacements 2D obtenu dans ce secteur confirme l'hypothèse de la déformation de cette zone dans un couloir limité par des accidents N40. Compte-tenu de l'existence d'une composante décrochante sur certaines failles N120 et sur toutes les failles N160, l'interprétation cinématique proposée dans ce secteur correspond à une déformation en transtension, probablement liée à une extension régionale, orientée N50, oblique par rapport aux bordures N40 du système déformé. Les blocs basculés sont alors séparés par des failles normales N120, sub-perpendiculaires aux bordures du couloir de déformation (les décrochements N40). Ces blocs sont eux-mêmes découpés par des décrochements N160, contemporains, qui permettent d'accommoder la composante décrochante de la déformation.

Minimisation des déplacements 2D

La cartographie des déplacements est dépendante du référentiel choisi pour l'ajustement des blocs. L'interprétation de ces déplacements peut s'avérer complexe, surtout pour une déformation hétérogène [Ramsay et Huber, 1983]. La réalisation de plusieurs tracés de champs de déplacements pour une zone donnée permet d'effectuer des comparaisons et de faciliter leur interprétation. L'obtention de nouveaux tracés n'est possible qu'en choisissant de nouveaux repères fixes pour réaliser la superposition des deux configurations. Ce repère peut être un bloc de la zone déformée, une ligne fixe (limite de bloc) ou un point fixe (propre à la zone déformée, ou extérieur).

Au cours de la restauration des structures dans l'état ante-déformation, le contour du bloc choisi change et la superposition stricte des deux contours (état initial et état final du bloc) n'est pas possible. Cette superposition est possible pour une ligne fixe (portion du contour), mais l'utilisation d'un point fixe offre une infinité de superpositions à une rotation près. La procédure retenue pour l'obtention rapide de plusieurs tracés de champs 2D consiste à choisir un point fixe commun aux deux configurations et à effectuer des séries de rotations autour de celui-ci. L'automatisation de cette méthode de tracé des déplacements se décompose en quatre étapes (figure V.43).

Figure V.43 Principe de superposition des deux configurations et champs de déplacements associés sur le secteur de Umm Shatt. a- Tracé obtenu pour les deux configurations (état initial et état final) superposées par rapport au barycentre du bloc 6; b- Tracé obtenu pour une superposition par rapport au barycentre du bloc 12.



1. Choix du point fixe et identification dans les deux configurations. Pour tester cette méthode, le barycentre associé aux points du contour de chaque bloc basculé est utilisé. Le calcul des barycentres s'effectue par le programme *barycalc.c*, à partir des coordonnées XY de chaque point de contour (état initial et état final).

2. Superposition de la configuration finale à la configuration initiale, par simple translation, et pour le barycentre d'un bloc donné. Ceci s'effectue en recalculant les coordonnées XY des contours des blocs de la configuration finale par le programme *superpose.c* (figure V.43).

3. Rotation de la configuration finale par rapport à la configuration initiale, autour du point fixe (programme *rotcalc.c*). La valeur de l'angle de rotation choisi devra bien évidemment rester dans des proportions "réalistes".

4. Itérations successives des étapes précédentes, sur tous les blocs de la zone, considérés à leur tour comme fixes, extension du calcul à d'autres points fixes.

La mise au point de cette méthode automatique de tracé des champs 2D permet de réaliser une infinité de superpositions des deux configurations, selon le pas de rotation choisi. Pour analyser l'ensemble de ces tracés, le déplacement cumulé fini est calculé sur toute la zone pour chaque superposition réalisée. La figure V.44 illustre les résultats obtenus en représentant ce champ cumulé en fonction de la valeur de la rotation appliquée.

La valeur nulle de l'angle de rotation indique la première superposition réalisée. Celle-ci est identique pour tous les points fixes choisis. Elle correspond à la superposition des deux configurations obtenue avec l'utilisation de la ligne N40 prise comme référentiel à l'extrémité est du bloc 7 (paragraphe V.3.4). Cette superposition correspond donc à une simple translation des deux configurations l'une par rapport à l'autre. L'angle de rotation choisi pour le tracé des champs est de $\pm 15^\circ$, avec un pas de $0,5^\circ$. La valeur absolue du déplacement cumulé n'a pas de signification particulière. Seules les variations relatives d'un point fixe à l'autre sont analysées.

L'analyse de la figure V.44 met en évidence les points suivants :

- pour chaque barycentre de bloc considéré, et pour chaque rotation successive, la courbe du champ cumulé présente un minimum,
- le minimum obtenu est différent selon le point fixe utilisé pour le calcul,
- le champ cumulé minimum est obtenu sur l'ensemble des superpositions testées pour le barycentre du bloc 6, alors que le champ cumulé maximum est obtenu pour le barycentre du bloc 13,
- la superposition pour laquelle le champ cumulé est minimum (bloc 6) correspond à une valeur de rotation de 3° par rapport à la superposition initiale.

Le champ obtenu pour le déplacement cumulé minimum sur l'ensemble de la zone (barycentre du bloc 6 fixe), est illustré sur la figure V.45.

Figure V.44 Variation du déplacement cumulé sur l'ensemble de la zone étudiée, en fonction de l'angle de rotation entre les deux configurations (état initial et état final), au cours de leur superposition.

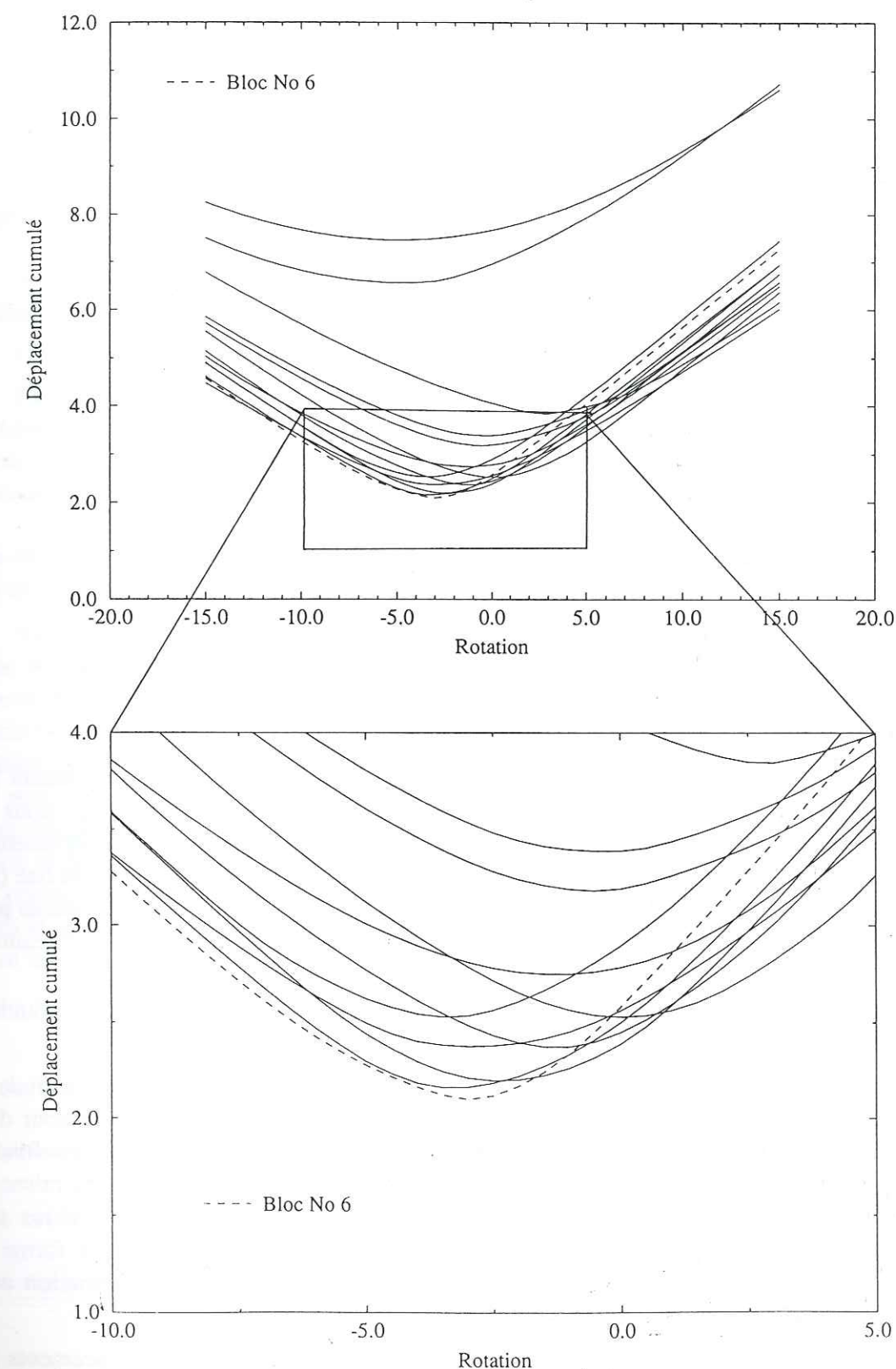
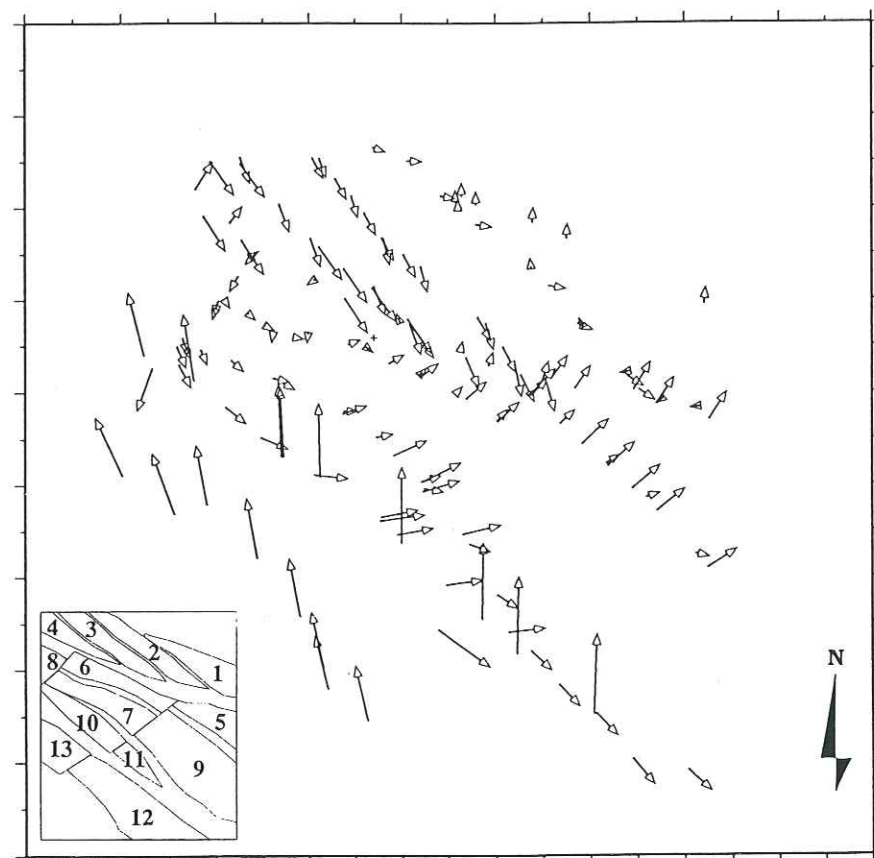


Figure V.45 Cartographie des déplacements 2D sur le secteur de Umm Shatt pour la superposition des deux configurations obtenue avec un déplacement cumulé minimum (barycentre du bloc 6 fixé).



Les tracés de champs 2D obtenus montrent des variations importantes des valeurs des déplacements et de leurs orientations, dans le cas d'une superposition obtenue pour un déplacement cumulé quelconque (figure V.43). Par contre, le tracé obtenu pour le déplacement cumulé minimum (bloc 6) diffère peu de celui obtenu précédemment avec une ligne N40 fixe (figure V.42b). La méthode numérique de simplification du tracé des champs de déplacements pour ce secteur aboutit donc à un résultat voisin de l'analyse plus subjective réalisée précédemment (figure V.42b).

Cette méthode de simplification du tracé des champs 2D présente deux limitations importantes :

- l'utilisation du barycentre des blocs comme point fixe ne tient pas compte de l'altitude de ce point dans l'état déformé. De plus, avec le changement de géométrie du contour d'un bloc entre l'état initial et l'état final, les deux barycentres ne sont pas forcément confondus.
- la minimisation des déplacements 2D est difficile à justifier. Il serait préférable de raisonner en terme d'énergie minimale au cours de la déformation mais trop de paramètres sont manquants (énergie de frottement sur les failles, dissipation de l'énergie sous forme de chaleur ...). Un déplacement cumulé minimum serait obtenu pour une déformation avec bords libres mais cette approximation est trop forte pour être appliquée ici.

Cependant, l'utilisation de ce critère pour définir un tracé de champ de déplacements 2D semble possible, même si cet aspect de l'analyse des déplacements mérite probablement d'être approfondi.

Rotations de blocs autour d'axes verticaux

L'existence d'une déformation extensive oblique par rapport aux bordures du système, mise en évidence par l'analyse du champ de déplacements et des données structurales, implique nécessairement son accommodation par des rotations des blocs autour d'axes verticaux [Jackson et McKenzie, 1983; Ron et al, 1984; Whitejack et Jamison, 1986; Cobbold et al, 1989; Simeakis et al, 1989; Tron et Brun, 1991]. La disposition des blocs dans l'état initial est donc comparée à celle de l'état final. La configuration initiale utilisée pour cette comparaison correspond à l'ajustement des blocs selon leur forme, réalisé dans le paragraphe V.3.4 (figure V.42b).

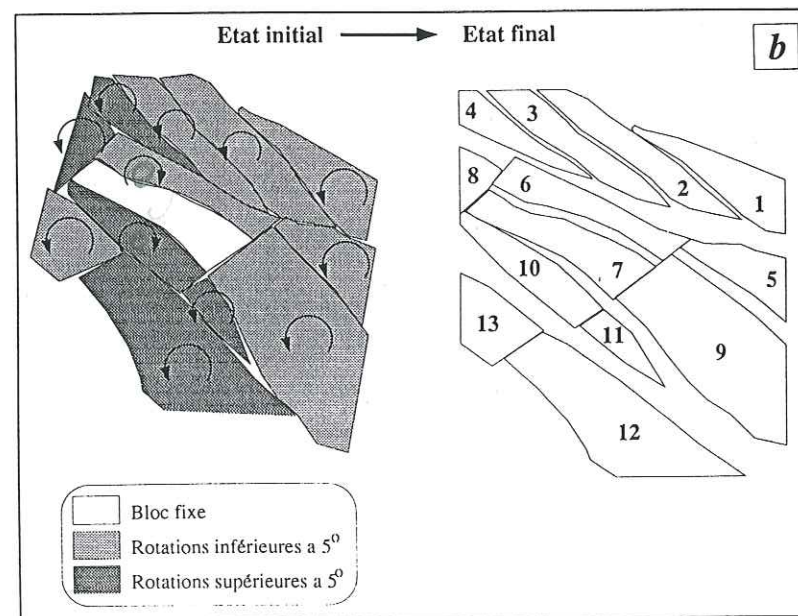
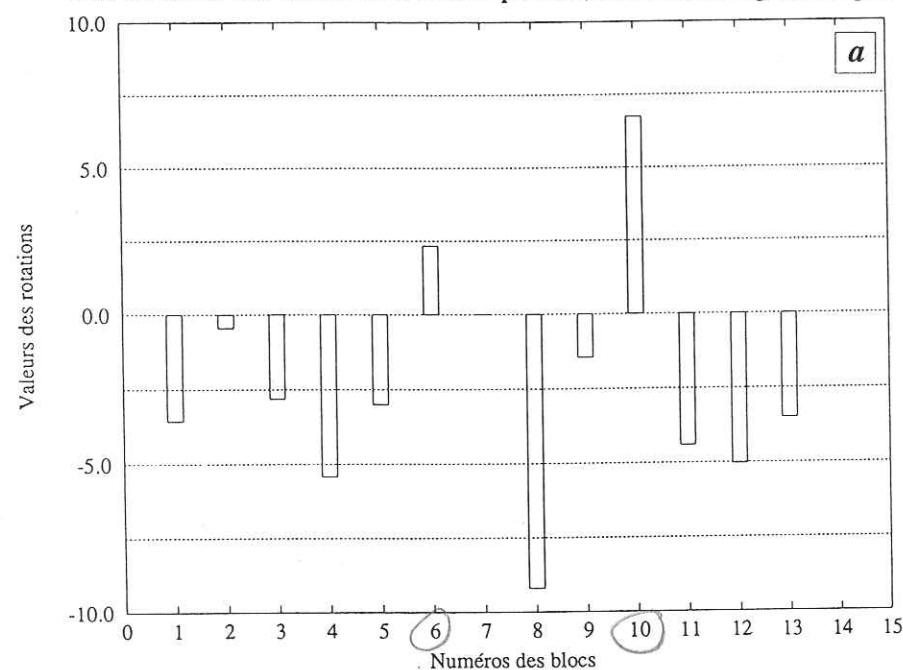
Cette comparaison entre les configurations initiale et finale est réalisée pour chaque bloc séparément, en plusieurs étapes :

1. Superposition des deux configurations au niveau de la limite Est du bloc 7, selon la procédure décrite précédemment (programmes *island2xy.c* et *superpose.c*).
2. Calcul du barycentre pour chaque bloc de chaque configuration (programme *barycalc.c*).
3. Détermination de la rotation d'un bloc donné par le calcul de l'angle entre la ligne joignant le barycentre et un point du contour du bloc dans l'état initial, et la ligne joignant le barycentre et ce même point de contour pris dans l'état final. Ce calcul est réalisé pour chaque point de contour du bloc concerné et une valeur moyenne est ensuite calculée (programme *rotdef.c*).

On obtient alors pour chaque bloc une valeur de rotation relative à la superposition choisie pour les deux configurations (figure V.46), et dépendant de l'état initial obtenu pour la zone déformée.

Sur la figure V.46, le bloc 7 ne présente bien évidemment aucune rotation (limite Est du bloc considérée comme fixe). La rotation la plus importante est obtenue pour le bloc 8. Ceci correspond probablement à un effet de bord, lié à une mauvaise cartographie du bloc représenté partiellement sur la zone étudiée. Les valeurs de rotations obtenues pour les autres blocs sont faibles (environ 5°). Les blocs 1, 2, 3, 4 montrent des rotations dans le sens horaire et forment un ensemble homogène, déjà mis en évidence par les trajectoires de déplacement (zone Nord). Pour les blocs 5, 6, 9, 10 et 11 qui appartiennent à la zone centrale, les rotations sont différentes selon la position des blocs par rapport à l'accident N40 servant de ligne fixe. Les blocs 5, 9 et 11 présentent une rotation dans le sens horaire, alors que les blocs 6, et 10 montrent une rotation dans le sens anti-horaire. Le sens de ces rotations qui diffère d'un bloc à l'autre est compatible avec les déplacements obtenus dans ce secteur, et son interprétation en déformation transtensive.

Figure V.46 a- Valeurs des rotations relatives des blocs du secteur de Umm Shatt; b- Représentation des rotations autour d'axes verticaux sur les blocs basculés. Le bloc 7 est considéré comme fixe au cours du calcul. Les rotations sont choisies positives, selon le sens trigonométrique.



Les valeurs de rotation obtenues sont faibles, de l'ordre de 5° et leur vérification sur le terrain semble difficile à envisager compte-tenu de la précision des méthodes paléomagnétiques par exemple. Cependant, les valeurs obtenues ne sont qu'une approximation de la valeur de rotation exacte, du fait de la méthode de calcul employée. Cette méthode est totalement dépendante de l'ajustement des blocs après restauration, et du point fixe choisi pour superposer état initial et état final. De plus, la comparaison des angles entre barycentres et points de contour des deux configurations n'est possible que si la cartographie du contour des blocs est bien définie et change peu. Cette approximation n'est pas forcément valable pour tous les blocs de la zone étudiée. Ces rotations des blocs autour d'axes verticaux, mises en évidence par cette méthode, restent pourtant cohérentes avec les autres données disponibles sur le secteur de Umm Shatt (terrain, imagerie, champs de déplacements).

5.1.3 Interprétations des déplacements 2D dans le secteur de Ba'tays

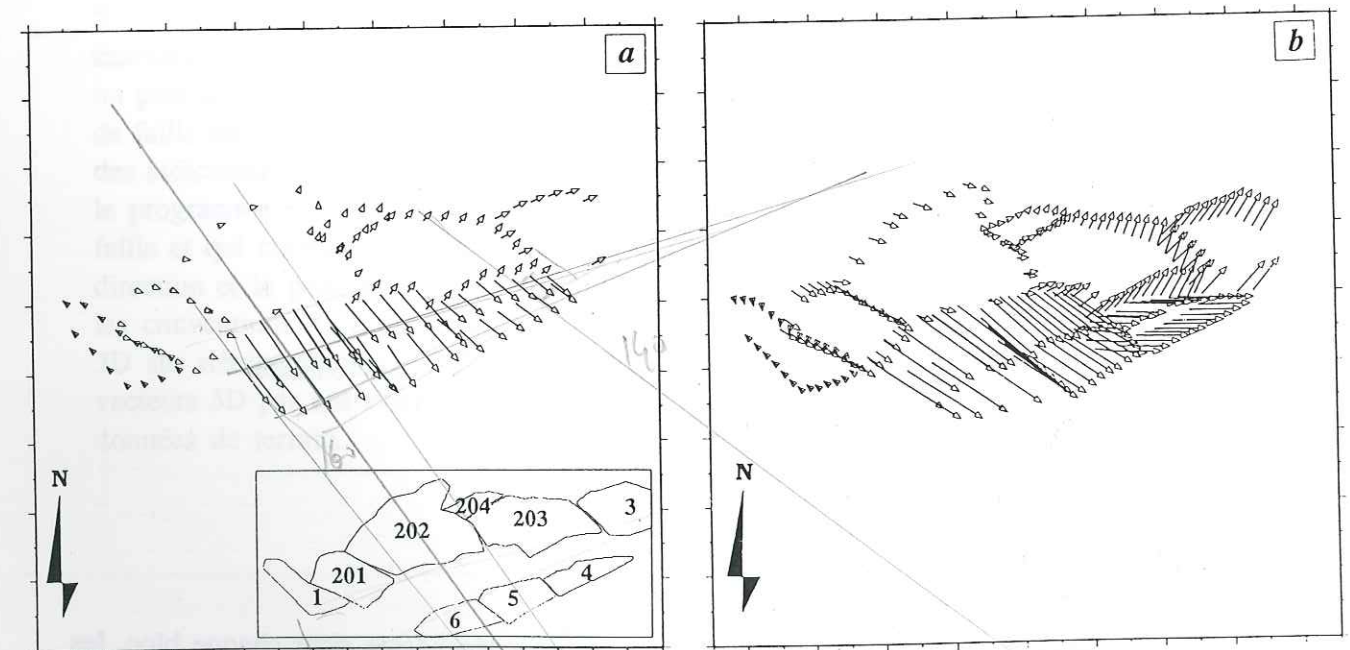
Le tracé des déplacements 2D est effectué dans ce secteur à partir du référentiel fixe correspondant à un accident décrochant orienté N140 et qui constitue l'extrémité ouest du bloc 1 (paragraphe V.3.4).

Dans le secteur de Ba'tays, les deux modèles (plan et flexuré) ont été élaborés. La comparaison des deux modèles a montré que le modèle plan n'était pas adapté à ce secteur. Les déplacements sont donc calculés seulement sur le modèle flexuré, pour chaque ajustement réalisé (paragraphe V.3.4 et figure V.47). Comme pour le secteur de Umm Shatt, les vecteurs sont tracés depuis l'état initial, vers l'état final.

La répartition des déplacements 2D est peu différente entre les deux tracés (excepté pour le bloc 4) (V.47 a, b). On distingue une zone Nord avec des déplacements faibles et une zone Sud, avec des déplacements importants. Les orientations des déplacements dans la zone Sud diffèrent dans le détail entre les deux tracés (bloc 4), mais indiquent des déplacements plus importants à l'Ouest qu'à l'Est, avec une direction N140 à l'Ouest se redressant progressivement jusqu'à N120 à l'Est. Ceci peut indiquer une ouverture en ciseau de la faille qui sépare les deux zones. Dans la zone Nord, les directions évoluent depuis N120 environ à l'Ouest, jusqu'à N70 environ à l'Est. Cette évolution semble difficile à expliquer, sauf dans le cas du bloc 3, séparé des autres par une faille de transfert N140, et qui est donc situé dans une autre zone déformée.

Cependant, la chronologie mal définie des phases extensives dans le secteur de Ba'tays par rapport aux secteurs plus à l'Est sur la marge, les limites de validité des modèles utilisés et l'erreur réalisée dans la cartographie des blocs 5 et 6, incitent à utiliser les interprétations sur la cinématique de ce secteur avec précaution.

Figure V.47 Cartographie des champs de déplacements 2D du secteur de Ba'tays. a- Ajustement des blocs selon les trajectoires de dépliage; b- Ajustement des blocs selon leur forme.



V.5.2 Champs de déplacements 3D

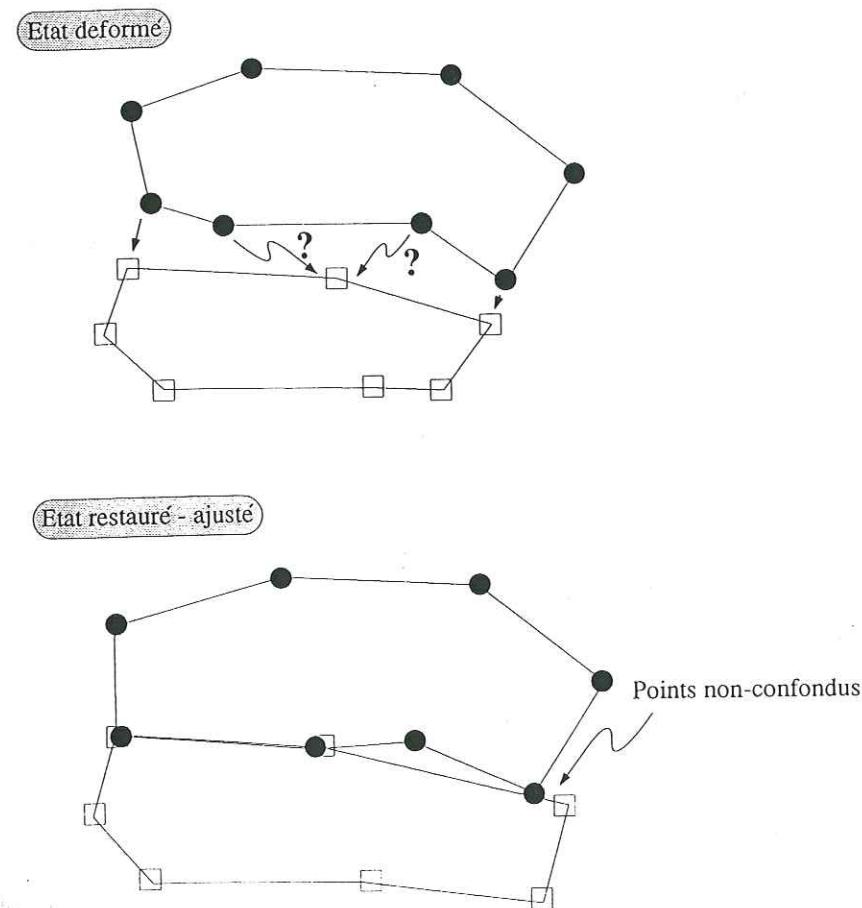
Les coordonnées du contour des blocs sont connus avant déformation (XY0) et après déformation (XYZ). Il est donc possible de caractériser les déplacements finis en trois dimensions. La projection de ces déplacements sur les plans de failles permet ensuite d'estimer les

mouvements sur ces failles. Cette approche nécessite de connaître la géométrie des failles ou de la modéliser de façon réaliste. Le modèle plan s'applique correctement aux surfaces des blocs basculés du secteur de Umm Shatt, et fournit des résultats cohérents lors de la quantification de l'extension et des déplacements 2D, confirmés par les données de terrain. L'utilisation d'un tel modèle implique une géométrie plane des failles séparant les blocs basculés [Gibbs, 1983; Brun et al, 1985]. L'analyse des déplacements 3D est donc envisagée seulement à partir du modèle plan de blocs basculés, construit dans le secteur de Umm Shatt.

5.2.1 Méthodologie

Le tracé des champs 3D pour un même bloc, qui consiste à exprimer les déplacements associés à la déformation continue en trois dimensions, n'a pas été abordé ici. Le tracé est envisagé seulement pour l'analyse de la zone déformée dans son ensemble. Cette analyse utilise les déplacements aux limites des blocs et non plus le déplacement des blocs eux-mêmes. Les déplacements 3D sont donc calculés entre deux points, initialement en contact sur la surface non-déformée, et séparés actuellement par la faille.

Figure V.48 Limites du calcul des champs 3D sur le secteur de Umm Shatt, à partir des données disponibles (points de contour des blocs).



La cartographie du contour des blocs étant totalement indépendante pour chaque bloc, les points de contour de deux blocs basculés adjacents, situés de part et d'autre d'une faille ne peuvent être utilisés. Pour deux blocs voisins, séparés par une faille, la forme du contour n'est pas identique et surtout, chaque point du contour d'un bloc n'a pas forcément d'homologue sur le bloc adjacent (figure V.48). Il est nécessaire de rechercher un marqueur géologique, décalé par la faille dans l'état actuel de la zone déformée.

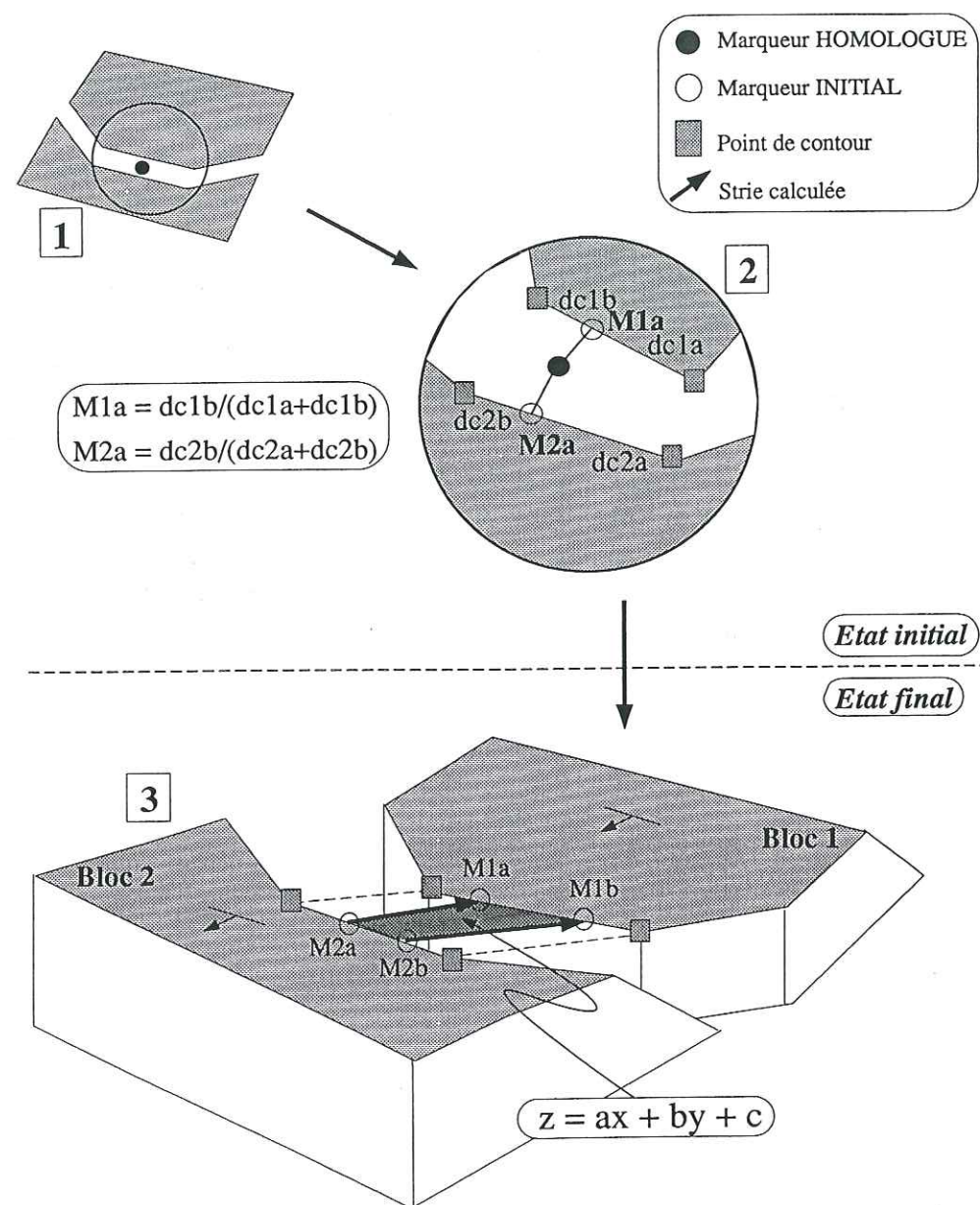
Les remarques précédentes conduisent à définir la procédure de calcul suivante :

1. Détermination des coordonnées XY des contours des blocs à partir des dessins d'ajustement réalisés dans IslandDraw selon la procédure décrite pour les champs 2D (programme *island2xy.c*).
2. Détermination des valeurs d'altitude de chaque point du contour, à partir du modèle plan, selon le même principe utilisé dans le chapitre 5 (paragraphe V.2.3). Pour les points du contour des blocs dans l'état initial, les altitudes sont nulles par définition.
3. Définition de marqueurs géologiques sous la forme de points homologues placés sur les contours des blocs dans l'état initial. Ceci s'effectue sur le dessin des blocs ajustés (IslandDraw), en positionnant plusieurs marqueurs homologues à proximité du contour de blocs adjacents dans l'état initial (figure V.49). Le calcul des coordonnées de ces marqueurs sur les contours de chaque bloc précisément, est réalisé par le calcul de la distance minimale entre le marqueur homologue et le contour du bloc (programme *marqalc.c*). On obtient alors un marqueur initial (figure V.49) pour chaque bloc concerné, défini par ses coordonnées XY dans l'état initial. La réalisation de ce calcul est motivée par le fait que l'ajustement des blocs laisse fréquemment des vides ou des recouvrements entre les différents contours des blocs.
4. Calcul des coordonnées XYZ dans l'état final, pour les marqueurs initiaux. Ceux-ci sont repérés par rapport aux points de contour qui les encadrent, dans l'état initial (figure V.49). La distance entre un marqueur initial donné (M1a sur la figure V.49) et le point de contour du bloc le plus proche (dc1b par exemple) est mesurée, ainsi que la distance entre les deux points de contour encadrant le marqueur (dc1b + dc1a). Le rapport entre ces deux distances est reporté sur les contours homologues des blocs déformés, pour localiser chaque marqueur initial dans l'état final. Le programme *mvtfaille.c* effectue ce calcul, à partir des coordonnées XY du contour dans l'état initial, des coordonnées XYZ dans l'état final, et des coordonnées XY des marqueurs initiaux. Il fournit un fichier contenant les coordonnées des vecteurs 3D, entre deux blocs adjacents.
5. Projection des vecteurs 3D sur les plans de failles séparant les blocs. Quatre marqueurs, calculés dans l'état final à partir de deux marqueurs initiaux adjacents (figure V.49), définissent un plan de faille local, entre les deux blocs auxquels ils appartiennent. L'équation de ce plan de faille est calculée, puis son orientation définie selon le même principe que la détermination des indicateurs de pendage mesurés sur les MNT (paragraphe V.1.3). Selon ce même principe, le programme *carastrie.c* définit le plongement de chaque vecteur 3D appartenant au plan de faille et qui correspond à une "strie calculée". Ce programme fournit un fichier contenant la direction et le pendage du plan de faille, ainsi que le plongement de la strie, exprimés selon les conventions du programme d'inversion STRESS. Ceci permet de représenter les vecteurs 3D sur stéréogrammes et d'envisager une comparaison entre les résultats de l'analyse de ces vecteurs 3D par une méthode d'inversion et les résultats de cette même analyse menée sur les données de terrain.

25 AOÛT 2003

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 57 40 58
Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr

Figure V.49 Principe de calcul de points homologues pour le calcul des champs 3D. Un marqueur homologue est positionné entre les limites des blocs dans l'état initial (1), puis sa projection est calculée sur chacun des blocs adjacents (2). Enfin, la position de ces marqueurs est déterminée dans l'état initial (3).

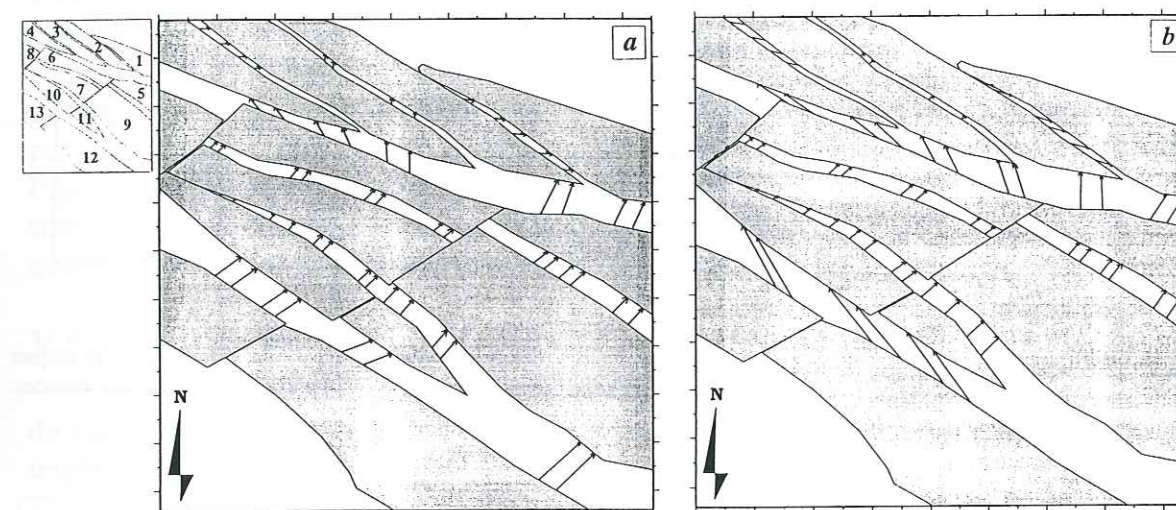


5.2.2 Distribution des vecteurs 3D — modélisation de stries

Le calcul des vecteurs 3D est effectué à partir des deux ajustements réalisés entre les blocs du secteur de Umm Shatt. La distribution cartographique des vecteurs 3D obtenus est tout d'abord étudiée, en projetant ces vecteurs sur le plan horizontal (figure V.50). Elle permet de distinguer les failles qui présentent un jeu normal (failles qui limitent les blocs 6, 7, 9 et 10 au nord), des failles qui présentent un jeu décrochant dont le sens peut être précisé.

Les directions des mouvements donnés par cette cartographie sont compatibles avec les données de terrain. Les déplacements sur les plans de failles situés au Nord des blocs 12 et 13 sont probablement plus réalistes dans le cas de l'ajustement utilisant les trajectoires de débasculement.

Figure V.50 Cartographie des déplacements 3D du secteur de Umm Shatt et schémas interprétatifs. a- Ajustement utilisant les trajectoires de débasculement; b- Ajustement à partir de la forme des blocs.



Les orientations des plans de faille calculés sont reportées sur un canvas de Schmidt en projection dans l'hémisphère inférieure (figure V.51). Sur cette figure, les croix représentées sur ces plans correspondent aux vecteurs 3D exprimés en coordonnées polaires et projetés sur chaque plan de faille (stries calculées).

L'obtention de plans de failles porteurs de stries théoriques permet d'envisager une analyse des directions du tenseur de contraintes associé. Les données "structurales" ainsi calculées sont donc traitées à l'aide du programme d'inversion STRESS (chapitre 2). La figure V.52 visualise les résultats de cette étude, par la direction de σ_3 obtenue et l'histogramme des écarts angulaires entre les stries théoriques données par le programme STRESS. Ce calcul est effectué pour chacun des ajustements réalisés.

Figure V.51 Stéréogramme des plans de failles et des stries théoriques calculés à partir des déplacements 3D dans le secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des trajectoires de débasculement; b- Ajustement selon la forme des blocs.

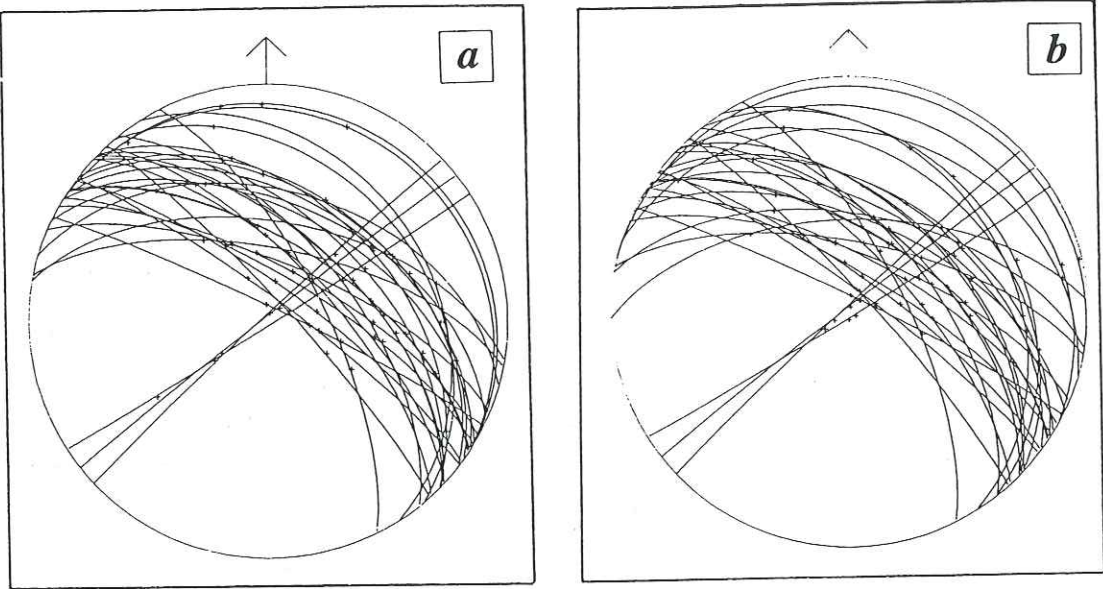
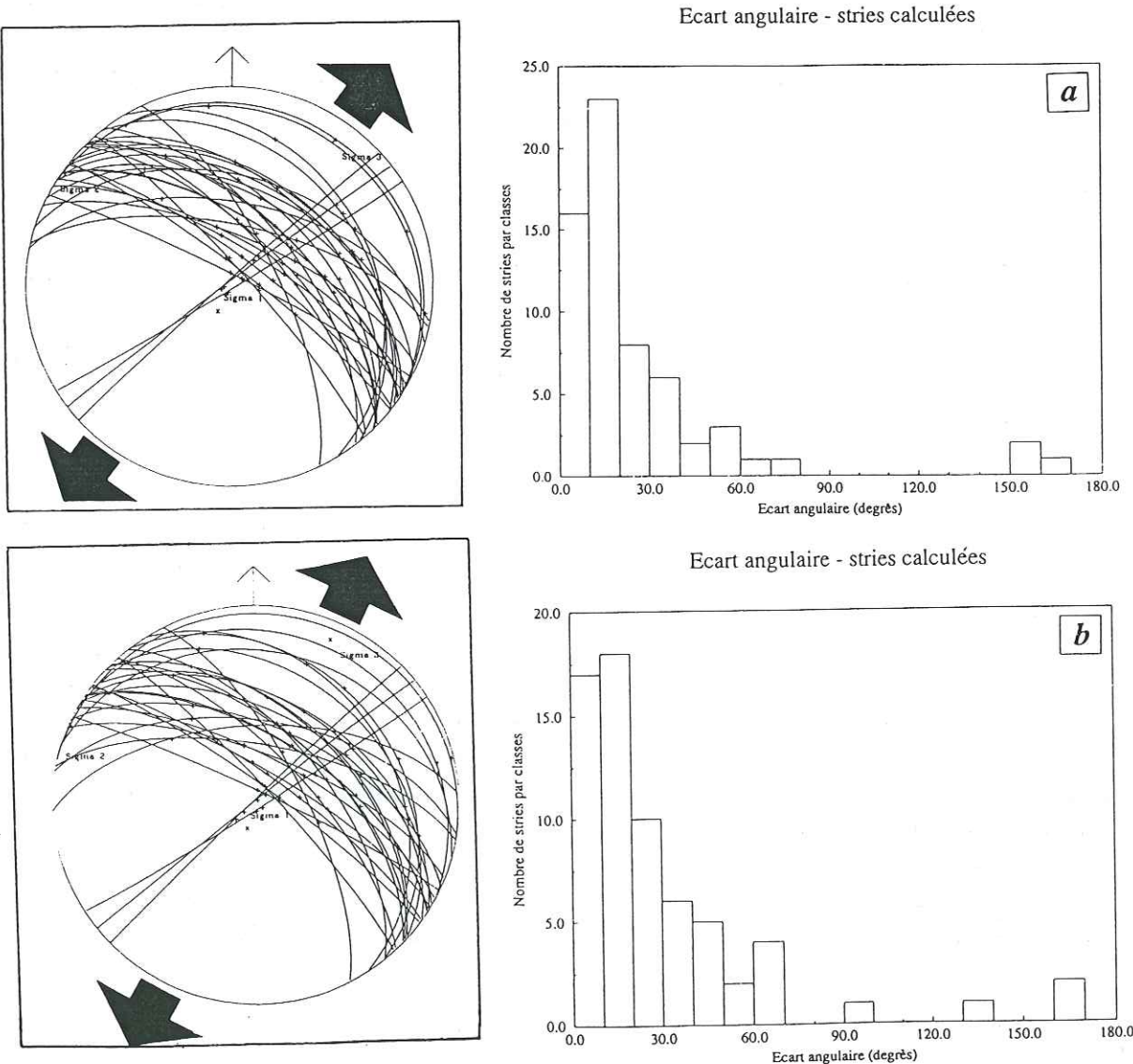


Figure V.52 Résultats de l'application du programme d'inversion de données aux stries calculées à partir du modèle du secteur de Umm Shatt. a- Ajustement tenant compte des trajectoires de débasculement; b- Ajustement intégrant l'ensemble des données.



L'écart angulaire entre stries théoriques et stries calculées est faible, sauf pour quelques stries. Cependant, la séparation de plusieurs phases à partir de ces données est impossible puisque les stries calculées correspondent à des déplacements finis, entre état initial et état final, sans aucune indication de chronologie.

La direction de σ_3 donnée par le programme d'inversion est de N34 dans le cas de l'ajustement utilisant les trajectoires de débasculement et de N24 pour l'autre ajustement. La direction de l'extension moyenne, obtenue sur le secteur à partir de l'étude structurale (chapitre 3), est de N50.

Les stries calculées à partir des images satellitaires représentent la projection de déplacements finis sur les plans de failles de l'ensemble de la zone étudiée. Les stries mesurées sur le terrain sont plutôt une représentation locale et infinitésimale du déplacement sur les plans de faille, et c'est l'analyse statistique de la population de failles qui permet de reconstituer le tenseur de contraintes. La différence obtenue entre les calculs de la direction d'extension est peut-être due à l'échelle à laquelle sont analysées les données. Cependant, l'écart entre l'extension donnée par les stries calculées et celle donnée par les stries mesurées est plus faible dans le cas de l'ajustement utilisant les trajectoires de débasculement. De plus, les déplacements 3D obtenus sont totalement dépendants de l'ajustement réalisé. Leur analyse peut permettre d'estimer la qualité du dessin de la géométrie des blocs et de leur ajustement.

V.5.3 Discussion

L'objet de la discussion présentée ici est de déterminer l'intérêt et les limites de validité du calcul des champs de déplacements pour des zones déformées en contexte extensif. Les implications régionales des résultats précédents seront discutés dans le chapitre 6.

Quatre types de déplacements peuvent être tracés à partir de la comparaison entre état initial et état final (tableau V.53).

Tableau V.53 Apports du calcul des champs de déplacements

Entité	VECTEURS 2D	VECTEURS 3D
BLOC	1	2
ZONE DEFORMÉE	3	4

Comme pour la quantification de l'extension, les divers calculs élaborés pour la détermination des champs de déplacements 2D ou 3D, semblent cohérents. Les limites de validité pour chacun d'entre eux sont les suivantes :

1. Les déplacements 2D, pour chaque bloc individuel, contraignent l'ajustement des différents blocs entre eux. Les résultats obtenus sur le secteur d'Umm Shatt le confirment. Ils indiquent que l'utilisation de ces déplacements lors de l'ajustement est plus efficace que la méthode qui privilégie la minimisation optimale des vides et recouvrement (forme des blocs prépondérante). L'utilisation de ces déplacements 2D est justifiée puisque la méthode de restauration utilisée pour chaque bloc (dépliage ou débasculement) est correcte.
2. Le tracé des champs de déplacements 3D, pour chaque bloc, conduit à une reconstitution locale de la géométrie du plan de faille. En effet, l'ensemble des lignes joignant deux points adjacents du contour d'un même bloc, entre l'état initial et l'état final définit une surface sur laquelle se produisent tous les déplacements entre état initial et état final. Cette surface représente alors une visualisation de la géométrie de la faille, pour une cartographie du bloc basculé donnée. Du fait de la difficulté de contraindre la géométrie de la faille en profondeur, à partir des seules

données topographiques et de télédétection, cet aspect du tracé des vecteurs 3D n'a pas été développé ici.

3. Les déplacements 2D obtenus pour la zone déformée sont une combinaison de vecteurs associés à la déformation des blocs basculés (déformation continue), et de vecteurs associés au jeu sur les failles (déformation discontinue), dont les incertitudes respectives se cumulent. Ces incertitudes sont essentiellement liées à la difficulté de cartographier le contour des blocs et des failles, ainsi qu'à l'ajustement des blocs entre eux. Ainsi, les champs 2D obtenus sont valables pour une géométrie de la zone déformée donnée, qui constitue une solution possible mais non-unique, pour la reconstitution de l'état initial de la zone déformée.

4. Enfin, la reconstitution des mouvements sur les failles, à partir du tracé des champs de déplacements en 3D, et entre les configurations initiale et finale, nécessite la connaissance de la géométrie de ces failles. Son application est donc restreinte au modèle plan (secteur de Umm Shatt). De plus, le tracé de ces vecteurs 3D est l'intégration d'une composante liée au débasculement des blocs ainsi qu'une composante liée à la fracturation. Ces vecteurs de déplacements 3D projetés sur les plans de faille correspondent à des déplacements finis, ce qui n'est pas toujours le cas des plans mesurés sur le terrain.

L'ensemble de ces remarques montre clairement que les limites de validité du calcul des déplacements sont associées à la qualité de l'ajustement des blocs. Cet ajustement, c'est-à-dire la définition des conditions aux limites de ces blocs, est primordiale pour le dessin des champs de déplacements, et tout particulièrement lors de l'analyse de la totalité de la zone déformée. Il dépend de la géométrie des structures déformées, de leur restauration mais également du choix du référentiel. Cependant, l'homogénéité des résultats obtenus notamment sur le secteur de Umm Shatt valide cette méthode d'étude. Dans le cas du secteur de Ba'tays, le cadre géologique est moins bien contraint. La validité du champ de déplacements 2D obtenu est moins bonne, même si celui-ci reste cohérent avec les données de terrain.

V.6 Conclusions

Les résultats obtenus au cours de ce chapitre permettent de définir les limites de la méthode employées pour la quantification de l'extension et des déplacements.

L'utilisation d'un MNT précis, dont les erreurs éventuelles sont connues et localisées, permet de maîtriser totalement les corrections effectuées. Les diverses analyses réalisées au cours de cette étude confirment la validité des mesures de marqueurs géologiques, directement sur ces MNT.

La nécessité de s'imposer un modèle pour la surface des blocs basculés constitue une autre limitation. Le choix des modèles utilisés ici est guidé par la définition du problème géologique posé c'est-à-dire par les données structurales disponibles sur les blocs basculés. Dans le cas du modèle plan, une seule valeur de pendage peut être attribuée à chaque bloc. Ceci augmente l'incertitude dans le calcul de l'extension, si le marqueur géologique qui fournit le pendage n'est pas vraiment représentatif du pendage réel du bloc, c'est-à-dire si le problème géologique est mal posé ! De même, l'utilisation d'un modèle flexuré rend compte des données dans le cas de variations de pendage au dos des blocs par exemple, mais son utilisation n'est efficace que si cette variation est expliquée (géométrie des failles, crochon de failles, ...). Enfin, une limitation commune aux deux modèles est la non-prise en compte de la déformation interne des blocs, pourtant confirmée par les données de terrain (chapitre 3). Une façon d'en tenir compte serait de découper les blocs basculés par des failles fictives [Audibert, 1990; Guillier, 1991]. Ceci permet en effet un ajustement des blocs le long de ces failles et revient à exprimer la déformation interne

en terme de déformation aux limites des blocs. Une autre approche possible serait de quantifier la déformation interne (dykes notamment), à partir des MNT, ou par une étude structurale sur le terrain. Les améliorations des modèles concernant la déformation interne des blocs n'ont pas été envisagées au cours de ce travail.

L'étape de restauration des structures au sens strict est conduite différemment selon le modèle utilisé pour la zone déformée. Le "débasculement" des surfaces planes et le dépliage des surfaces flexurées donnent tous les deux des résultats cohérents. Les méthodes ont été validées par différents tests réalisés, au cours de leur application aux blocs basculés des secteurs de Umm Shatt et de Ba'tays, ou à l'occasion d'autres études [Guillier, 1991; Gratier et Guillier, 1993].

Les véritables limites de cette méthode de quantification résident d'une part dans la cartographie des blocs sur les images, et d'autre part, dans l'ajustement des blocs restaurés pour reconstituer l'état initial. Les erreurs associées à la cartographie des blocs ne sont corrigées que par l'analyse précise des images et des données de terrain. Ceci n'est pas toujours possible (secteur de Ba'tays), et une étude comparative de plusieurs dessins semble indispensable (position du contour des blocs par exemple). Ceci permet de fixer les limites de variations des modèles construits. L'ajustement des blocs entre eux constitue un point important de la procédure de quantification de l'extension. C'est à la fois un "maillon faible" mais également un point de contrôle crucial dans le traitement des données. En effet, au cours de cette étape, il est difficile de faire intervenir des critères totalement objectifs et le choix d'une hypothèse de travail (référentiel fixe notamment) est nécessaire. En fait, l'analyse des déplacements obtenus doit permettre de préciser les limites de validité de l'ajustement des blocs, en comparant leur tracé aux données de terrain et d'imagerie.

L'analyse de ces résultats conduit donc à deux conclusions méthodologiques importantes concernant la quantification de l'extension et des déplacements :

1. il est indispensable que toutes les étapes de construction du modèle de la zone déformée, et de sa restauration dans son état ante-déformation soient étroitement contraintes par toutes les données structurales disponibles (terrain et images). Le non-respect de ce contrôle et de ce retour aux données enlèverait toute signification à la quantité d'extension ou à l'interprétation des champs de déplacements obtenus.
2. les tests réalisés au cours de cette étude montrent que la méthode de quantification de l'extension est cohérente et n'introduit pas d'erreurs supplémentaires au cours des divers calculs réalisés. Les incertitudes qui restent quant à la validité des résultats proviennent uniquement d'un problème géologique mal-contraint.

Les implications régionales de ces résultats font l'objet d'une partie du chapitre suivant.

VI

CONCLUSIONS GENERALES

VI CONCLUSIONS GENERALES

Ce dernier chapitre reprend les principaux résultats des chapitres précédents en analysant leurs implications géodynamiques. Les avantages et les limites des méthodes utilisées au cours de ce travail sont présentés. Les résultats obtenus lors de l'analyse de la marge sud du Yémen permettent de proposer un schéma interprétatif de la cinématique des déformations extensives, à l'échelle de l'ensemble du point triple.

VI.1 Cinématique de l'extension sur la marge sud du Yémen

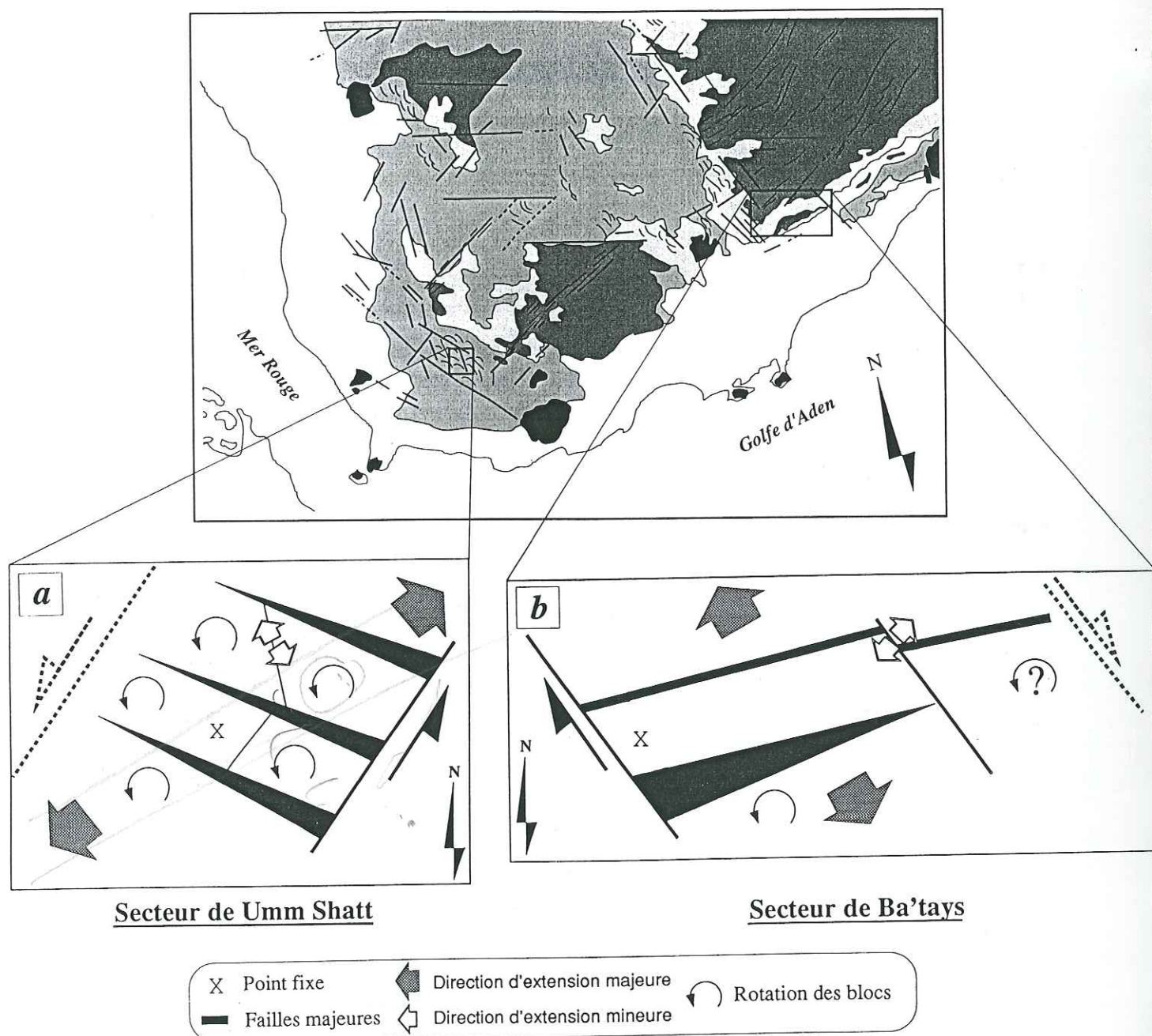
La déformation extensive au Yémen a été étudiée dans trois secteurs différents (figure III.8), à partir de données de terrain et par imagerie (chapitre 3).

Les secteurs de Umm Shatt et de Dhala ont des caractéristiques géométriques voisines. La déformation extensive s'exprime dans les trapps volcaniques et la couverture sédimentaire, par des systèmes de blocs basculés séparés par des failles normales, N110 en moyenne, et des décrochements conjugués, N150 environ (chapitre 3). La taille des blocs basculés est similaire (largeur de 2 à 3 km et longueur de 5 km environ), ainsi que leur pendage moyen (20° environ). Ces blocs sont caractérisés par une déformation interne, sous forme de dykes (parallèles aux failles normales). Les bordures de ces zones déformées sont constituées par des décrochements N40 à N70 (zones de transfert). Ces directions sont parallèles aux directions structurales du socle panafricain (shear zones et plis isoclinaux) et leur jeu décrochant est antérieur à la mise en place des systèmes de blocs basculés. L'extension moyenne, déduite de l'analyse microtectonique, est orientée N50 dans les deux secteurs. Elle est datée du Miocène moyen par Huchon et co-auteurs [1991], ce qui est compatible avec nos observations.

Dans le secteur de Ba'tays, des failles normales N70 affectent les séries sédimentaires mésozoïques et le socle panafricain. Elles séparent des blocs basculés de 35° en moyenne, plus grands que ceux des secteurs précédents : 5 à 10 km de large et plusieurs dizaines de kilomètres de long. Ces blocs présentent une déformation interne qui s'exprime sous la forme de failles normales secondaires. L'analyse structurale a révélé, localement, l'existence de phénomènes de glissement gravitaire, dans les séries du Jurassique supérieur, lié au basculement important des blocs. Le secteur de Ba'tays diffère également des deux autres quant au magmatisme associé à l'extension. En effet, il n'existe aucune marque du magmatisme oligo-miocène (trapps ou plutons) dans ce secteur. Les blocs basculés sont limités par des décrochements orientés N140 importants dans la partie Ouest. L'extension N140, déterminée sur les sites situés à proximité de ces décrochements, indique qu'ils jouent le rôle de failles de transfert dans l'accommodation de la déformation. Une phase d'extension N45, antérieure à l'extension moyenne N140, est présente dans ce secteur (chapitre 3). La chronologie relative des déformations est difficile à établir avec

la déformation qui affecte les secteurs de Umm Shatt et de Dhala, du fait de l'absence de trapps. La déformation dans ce secteur est au moins post-Crétacé.

Figure VI.1 Interprétation locale de la déformation extensive dans les deux secteurs étudiés sur la marge sud du Yémen. a- Secteur de Umm Shatt; b- Secteur de Ba'tays.



A partir de l'étude géométrique des zones déformées, la quantification de l'extension et des déplacements associés a pu être envisagé à partir de données complémentaires (chapitre 5). Les résultats obtenus confirment les différences mises en évidence entre les deux secteurs lors de l'analyse structurale sur le terrain et les images. La quantité d'extension, calculée dans le secteur de Umm Shatt, est de 15% environ. Dans le secteur de Dhala, l'obtention trop tardive des données topographiques n'a pas permis d'analyse détaillée. La distribution des failles, leur rejet moyen ainsi que le basculement des blocs, suggèrent que la quantité d'extension dans ce secteur est voisine de celle du secteur de Umm Shatt.

Dans le secteur de Umm Shatt, l'analyse du champ de déplacements met en évidence des rotations locales de blocs permettant l'accommodation de la déformation en transtension. Le schéma interprétatif rendant compte de la déformation locale du secteur de Umm Shatt à partir de ces divers résultats est illustré sur la figure VI.1a.

Dans le secteur de Ba'tays, la quantité d'extension est estimée à 35% environ. La géométrie des blocs basculés, totalement différente par rapport au secteur de Umm Shatt, conforte ce calcul. Le champ de déplacements obtenu traduit l'ouverture des failles normales en ciseau, au moins dans la partie Ouest du secteur (chapitre 5). La déformation de ce secteur est illustrée sur le schéma interprétatif de la figure VI.1b.

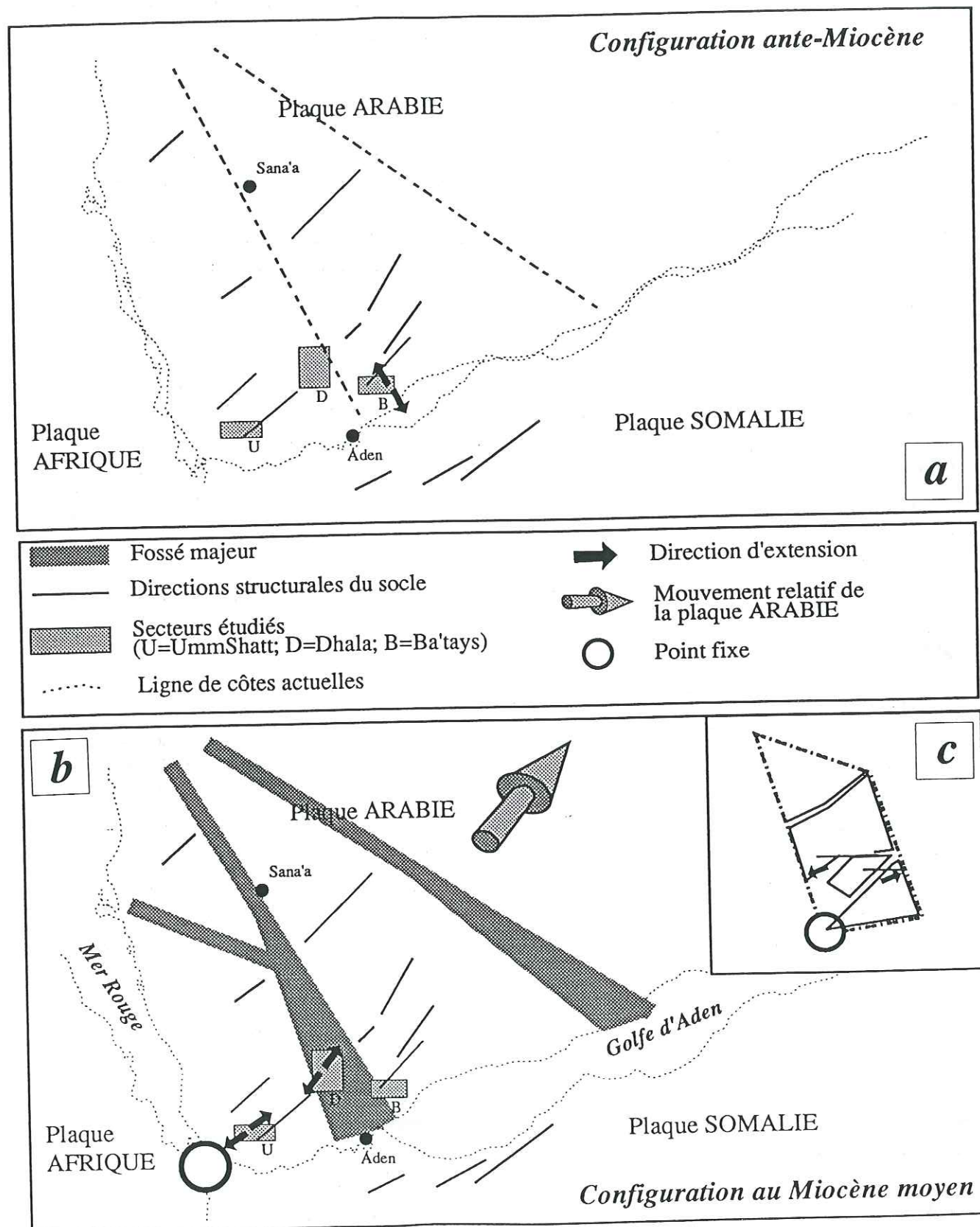
La géométrie des déformations totalement différente entre le secteur de Ba'tays et les secteurs de Umm Shatt et de Dhala, et l'écart angulaire important entre les directions d'extension déterminées, sont en faveur d'un épisode de déformation différent dans le secteur de Ba'tays. La phase d'extension N140 décrite dans ce secteur correspond probablement à une phase précoce du rifting qui se développe entre la fin du Crétacé et l'Oligocène. Ensuite, au Miocène moyen, la phase d'extension N50, décrite dans les secteurs de Umm Shatt et Dhala, se généralise à l'ensemble du Yémen.

En replaçant ces différents résultats à l'échelle du point triple, à partir de l'interprétation structurale réalisée (chapitre 3), et des études structurales récentes [Huchon et al, 1991; Tard et al, 1991; Jestin et Huchon, 1992; Souriot et Brun, 1992], un modèle de la déformation extensive de la marge sud du Yémen est proposé (figure VI.2).

Les premières phases de rifting débutent entre la fin du Crétacé et l'Oligocène. Elles se caractérisent par une extension régionale orientée N140, perpendiculaire aux directions structurales du socle panafricain dans le secteur de Ba'tays notamment (figure VI.2a). Cette extension est associée au développement de failles normales N70 qui se développent principalement dans le socle panafricain et les séries mésozoïques. La quantité d'extension est de 35% et les blocs de grande taille. Cette taille des blocs s'explique probablement par une épaisseur fragile importante du fait des conditions thermiques de la lithosphère. Les failles N70 sont décrites dans le secteur de Ba'tays, mais également au Nord des plateaux somalien [Behre, 1986] et éthiopien [Mohr, 1962]. La phase extensive associée est peut-être à rapprocher de l'extension N135 qui se développe au début du Cénozoïque dans le rift Est-africain [Vidal, 1985; Castaing, 1991].

Au Miocène moyen, se développe sur l'ensemble du Yémen une extension N50 sub-parallèle au mouvement relatif de la plaque Arabie [Gaulier et Huchon, 1991; Huchon et al, 1991; Jestin et Huchon, 1992; Menzies et al, 1992]. Un schéma interprétatif de la déformation à cette époque est illustré par la figure VI.2.

Figure VI.2 Modèle de déformation de la marge sud du Yémen à l'échelle du point triple. a- Déformation de la marge ante-Miocène; b- Déformation de la marge au Miocène moyen; c- Déformation interne du bloc Sud-Est.



Cette extension N50 permet le découpage de la marge en blocs crustaux, séparés par des fossés majeurs orientés N120 à N140 qui jouent le rôle de failles de transfert (figure VI.2b). Le mouvement relatif de la plaque Arabie induit une déformation avec un point fixe situé entre les plaques Afrique et Arabie (figure VI.2b). A l'intérieur de ces blocs, la déformation extensive s'exprime localement sous la forme de systèmes de blocs basculés (comme dans le secteur de Umm Shatt sur la figure VI.1b). Les blocs sont de plus petite taille que ceux du secteur de Ba'tays (épaisseur fragile plus réduite). La quantité d'extension est de 15%, mais la part de déformation interne (dykes, plutons) n'est pas négligeable. L'extension N50 est oblique par rapport aux bordures des zones déformées qui correspondent aux structures pré-existantes du socle panafricain. Il se produit une déformation en transtension, accommodée par des décrochements parallèles aux structures du socle (N40 environ), mais également orientés N90 à N100 (figure VI.2c). Le bloc Est, comprenant le secteur de Ba'tays, se comporte de façon rigide (simple mouvement de rotation entre les failles de transfert), ce qui renforce le rôle mécanique de la limite Est du fossé N140 situé entre Sana'a et Aden. Ceci correspond probablement à la localisation progressive de la déformation en Afar à cette époque [Jestin et Huchon, 1992].

La cartographie des blocs dans le secteur de Ba'tays a été discutée dans le chapitre 5. La quantité d'extension déterminée essentiellement sur une seule faille, et le basculement éventuel des séries sédimentaires ante-Crétacé sont des arguments en faveur d'une sur-estimation de l'extension dans ce secteur. Dans le secteur de Umm Shatt, la déformation interne des blocs n'est pas prise en compte lors du calcul de l'extension. Cette déformation s'exprime essentiellement sous forme de dykes qui sont localement très nombreux à la surface des blocs (chapitre 3). La valeur d'extension calculée dans le secteur de Umm Shatt est probablement sous-estimée. Des études complémentaires devraient permettre de contraindre un peu mieux le modèle proposé pour la déformation de la marge sud du Yémen.

1. Quantifier les déformations du secteur de Dhala. La quantification de l'extension et des déplacements devrait permettre de comparer l'évolution du fossé de Dhala à celle du secteur de Umm Shatt.
2. Quantifier les déformations associées aux décrochements N90 à N100 qui occupent une place importante dans l'accommodation de la déformation des blocs crustaux de l'Ouest du Yémen.
3. Contraindre la chronologie des déformations dans le secteur de Ba'tays. Les déformations observées correspondent aux phases précoces du rifting. Une datation précise des déformations est donc nécessaire, pour contraindre l'extension précédant l'ouverture du Golfe d'Aden.
4. Préciser la chronologie des événements magmatiques et tectoniques. Le magmatisme oligo-miocène se localise essentiellement dans la zone déformée qui s'étend entre la Mer Rouge et les failles bordières du fossé de Dhala. L'absence de produits magmatiques oligo-miocènes au-delà du fossé de Dhala implique peut-être le fonctionnement précoce des failles N140 de la zone de transfert. Il est donc intéressant de rechercher les phases tectoniques associées à la mise en place des trapps, ou même antérieures.
5. En complément de ces études sur le Yémen, la déformation sur la marge somalienne doit également être contrainte, ainsi que la déformation en Afar, contemporaine de celle du secteur de Umm Shatt.

VI.2 Synthèse méthodologique

L'analyse quantitative de l'extension et des déplacements associés envisagée au cours de ce travail fait appel à plusieurs types de données. L'utilisation et les apports de chacun de ces types de données sont rappelés.

VI.2.1 Contributions des données utilisées

Les images satellitaires utilisées au cours de ce travail se présentent sous forme numérique et sont issues des satellites Landsat TM et SPOT. Elles permettent une analyse en carte de la déformation et la réalisation des étapes suivantes dans la quantification de l'extension :

1. **Analyse structurale à petite échelle.** L'interprétation des images satellitaires à l'échelle du 1/1 000 000 ou du 1/500 000 permet de fixer le cadre géologique et tectonique général. Sur l'ensemble du Yémen, cette analyse permet l'élaboration d'une carte structurale interprétative à partir d'images Landsat TM au 1/1 000 000.
2. **Préparation de la campagne de terrain.** L'utilisation d'images satellitaires s'est avérée indispensable au Yémen, pour la définition des objectifs avant la mission de terrain. Du fait de l'absence de cartes topographiques précises, ces images permettent le repérage précis sur le terrain, des sites et des structures mesurés.
3. **Cartographie structurale de détail.** Celle-ci permet de décrire précisément la géométrie de la déformation. Elle est réalisée sur chacun des secteurs étudiés (Kenya et Yémen), à partir d'images traitées, à l'échelle du 1/100 000 ou du 1/50 000. L'analyse de la fracturation est alors envisagée directement sur les cartes structurales obtenues (Gregory Rift par exemple).
4. **Identification des marqueurs géologiques.** Cette étape permet de définir un horizon géologique représenté sur l'ensemble de la zone déformée. Elle est réalisée sur les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays au Yémen, à partir de la signature spectrale d'horizons géologiques sur les images multibandes Landsat TM.
5. **Cartographie du contour des blocs basculés.** Elle est établie à partir des ortho-images (projection des images dans la géométrie du MNT), et concerne les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays au Yémen. La définition du contour des blocs et la modélisation de la zone déformée qui en découle, dépend totalement de la qualité de l'interprétation réalisée.

Des données topographiques permettent une analyse tridimensionnelle de la déformation extensive. Ces données se présentent sous la forme de modèles numériques de terrain (MNT) calculés par auto-corrélation numérique directement à partir des couples stéréoscopiques SPOT. Elles sont utilisées pour les points suivants :

1. **Calcul des MNT et de l'ortho-image associée.** Le calcul de MNT par auto-corrélation de deux images SPOT stéréoscopiques permet d'obtenir des données topographiques de qualité, directement superposables à ces images.
2. **Aide à l'interprétation structurale.** Dans certains cas (secteur de Ba'tays notamment), l'utilisation de vues perspectives en complément des images permet de comprendre la géométrie des déformations ou la disposition des terrains et constitue une aide appréciable pour l'interprétation des structures géologiques visibles sur les images.
3. **Mesures des marqueurs géologiques.** Cette étape est réalisée sur les MNT des secteurs de Umm Shatt et de Ba'tays. Les marqueurs géologiques sont préalablement identifiés sur les images puis leurs coordonnées en XYZ mesurées directement sur les vues perspectives.
4. **Elaboration d'une colonne stratigraphique.** Ce travail est réalisé seulement sur le secteur de Ba'tays. Il est nécessaire pour la modélisation des surfaces de blocs basculés par un modèle flexuré. Il permet de recalculer en altitude les marqueurs géologiques mesurés, par rapport à l'horizon-repère choisi.

L'utilisation de ces données conduit à une modélisation tridimensionnelle des zones déformées, étudiées au cours de ce travail. Les surfaces des blocs basculés qui caractérisent ces zones sont modélisées pour reconstituer l'état ante-déformation des structures déformées. Ces

surfaces correspondent à des grilles régulières de points topographiques repérés dans la géométrie du MNT. Elles sont utilisées par les programmes de restauration des structures déformées.

La quantification de l'extension et des champs de déplacements associés peut alors être abordée à partir de ces modèles. Elle passe par la connaissance géologique de la zone déformée qui ne s'acquiert que sur le terrain :

1. **Acquisition de données sur la fracturation** (orientations de plans de failles, plongements de stries, critères de chronologie relative entre failles ...). Ces données sont ensuite traitées par des méthodes d'inversion, pour reconstituer les tenseurs de contraintes associés et les directions d'extension.
2. **Acquisition de données sur la surface des blocs basculés.** Elle concerne la nature des formations géologiques, les variations de pendage, ou la déformation interne sous forme de dykes ou de fracturation secondaire.
3. **Identification de marqueurs géologiques** pour la modélisation de la zone déformée (nature lithologique, représentativité sur la zone étudiée, variations éventuelles d'épaisseur ...).

VI.2.2 Validité du traitement des données

L'utilisation de données numériques pour produire un résultat géologique nécessite de connaître les erreurs associées à ces données et aux traitements réalisés. L'utilisation d'images sous forme numérique et la réalisation de tous les traitements permet de contrôler les interprétations structurales réalisées et les informations géologiques issues de ces images. Dans le cas des MNT, l'obtention du semis de points mathématiques, issus directement du calcul automatique des altitudes, facilite le contrôle des erreurs associées aux données. La phase de traitements préalables des MNT, coûteuse en temps, semble cependant indispensable pour l'utilisation qui est faite des MNT. De même, la procédure de détermination des orientations des marqueurs géologiques, à partir des mesures sur les vues perspectives, a été entièrement définie au cours de ce travail.

Les divers programmes élaborés ou utilisés au cours de ce travail pour traiter les données numériques n'apportent pas d'erreurs supplémentaires, comme les discussions au cours des chapitres précédents l'ont montré.

La validité des résultats obtenus dépend donc principalement des contraintes géologiques apportées aux problèmes posés. En ce qui concerne l'analyse géométrique de la fracturation (chapitre 4), la quantification des paramètres structuraux des failles (longueur, orientation ...) nécessite une grande qualité dans l'interprétation géologique des images. Les erreurs concernant la quantification de l'extension sur le Gregory Rift sont uniquement inhérentes à la méthode de calcul employée, qui ne tient pas compte de l'état ante-déformation. Cette méthode montre bien la nécessité de l'utilisation de données topographiques.

La quantification de l'extension et des champs de déplacements associés, appliquée aux zones déformées du Yémen, passe par la réalisation des étapes suivantes :

1. **Cartographie des contours des blocs basculés.** Les erreurs sont dues à une mauvaise interprétation des images entraînant une mauvaise localisation des failles séparant les blocs basculés. Cependant, l'incertitude est faible, et contrôlée à posteriori, lors de l'analyse de la validité du modèle de blocs basculés.
2. **Modélisation des surfaces déformées.** L'utilisation de deux modèles tridimensionnels différents (modèle plan et modèle flexuré) montre que le choix du modèle doit être approprié à la géométrie des surfaces déformées. Cette modélisation ne tient aucun compte de la géométrie des failles qu'il est difficile d'obtenir à partir des seules données topographiques. Elle ne prend

pas non plus en compte la déformation interne des blocs basculés pourtant mise en évidence sur le terrain (dykes du secteur de Umm Shatt par exemple). Leur prise en compte devrait rendre la modélisation des surfaces déformées plus réaliste.

3. Restauration des structures dans leur état-ante déformation. Le "débascullement" des structures ou leur dépliage constituent des étapes auto-cohérentes qui n'introduisent pas d'erreurs particulières. La limite de validité des résultats obtenus concernent seulement l'ajustement des blocs restaurés. La réalisation de deux modes d'ajustement différents (trajectoires de dépliage ou forme des blocs) montre que l'utilisation des trajectoires de dépliage permet un ajustement plus en adéquation avec les données structurales obtenues sur le secteur étudié.

4. Calcul des déplacements. L'obtention et l'interprétation des déplacements 2D est totalement dépendante de la définition de l'état initial (ajustement des blocs restaurés). L'utilisation de déplacements 3D comme marqueurs du déplacement le long des failles constitue peut-être un moyen de contraindre l'ajustement des blocs après restauration. Cependant, la méthode mise au point est basée sur l'utilisation de failles planes plutôt que listriques, sur lesquelles sont projetés les déplacements 3D (stries calculées). Cette méthode donne des résultats cohérents, mais nécessite une validation supplémentaire par l'étude d'un autre secteur par exemple.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus par l'utilisation combinée d'images Landsat ou SPOT, de MNT et de données de terrain concerne seulement la déformation crustale, du fait de l'échelle d'observation des structures fragiles. L'interprétation des valeurs d'extension ou de déplacements finis obtenus est réalisée à partir de l'expression actuelle des déformations fragiles sur les images satellitaires. Ces structures ne reflètent pas nécessairement une seule phase tectonique ou la seule déformation en extension analysée. De plus, l'échelle d'observation ne permet pas de prendre en compte toutes les structures participant à la déformation extensive des secteurs étudiés.

VI.3 Géométrie de la fracturation des zones déformées

La géométrie des zones déformées est obtenue à partir de l'analyse des structures fragiles sur le terrain et par imagerie. Cette analyse met en évidence des points communs à chacun des objets géologiques étudiés au cours de ce travail.

La déformation extensive s'exprime par l'association de failles normales et de décrochements qui limitent des systèmes de blocs basculés asymétriques. Dans le Gregory Rift, même si quelques systèmes en horst et grabens sont observés localement, les blocs sont tous basculés vers l'extérieur du rift. Ce même phénomène est observé sur les images du secteur de Dhala. Dans les secteurs de Umm Shatt et Ba'tays, le basculement des blocs se fait vers la mer, c'est-à-dire en direction du centre du rift.

L'analyse de la densité de fracturation à partir des images satellitaires, envisagée seulement sur le Gregory Rift, permet de distinguer différents domaines caractérisés par une fracturation spécifique. Ceci confirme le découpage du rift en bassins et zones d'accommodation, correspondant à des zones de transfert, envisagé par divers auteurs [Baker et al, 1972; Bosworth, 1987; Smith et Mosley, 1993]. L'analyse des images du Yémen montre que les systèmes de blocs basculés sont aussi limités par des failles de transfert. Les directions de ces diverses zones de transfert sont en général parallèles aux structures anciennes présentes dans le socle. C'est le cas des décrochements N140 au Kenya, parallèles à la zone de suture orogénique panafricaine, des décrochements N40 à N70 des secteurs de Umm Shatt et Dhala (Yémen), parallèles aux shear zones et aux axes des plis isoclinaux présents dans le socle panafricain. Par contre, dans le secteur de Ba'tays, ce sont les failles normales qui sont parallèles aux structures pré-existantes dans le socle.

Deux hypothèses permettent d'expliquer la distribution observée des structures fragiles décrites :

- un changement des directions d'extension au cours du temps permettant le développement de jeux décrochants sur des failles normales, comme le proposent Smith et Mosley [1993] pour le Gregory Rift par exemple,
- une accommodation de la déformation par failles normales, décrochements, et rotations de blocs, au cours d'une même phase d'extension, comme l'analyse de modèles expérimentaux le montre [Whitejack et Jamison, 1986; Gapais et al, 1991; Tron et Brun, 1991].

Les données de terrain et d'imagerie au Yémen ainsi que les champs de déplacements obtenus sont en faveur de la deuxième hypothèse (déformation en transtension). Ceci est particulièrement clair dans le secteur de Umm Shatt. L'angle entre direction d'extension et bordures des systèmes de blocs basculés (failles de transfert) est de l'ordre de 10 à 20°, au Kenya comme au Yémen, ce qui confirme aussi cette hypothèse. Cette hypothèse reste à confirmer par une analyse plus précise de la déformation aux bordures du système (secteur de Umm Shatt au Yémen par exemple), et une analyse plus complète des champs de déplacements sur le Gregory Rift.

VI.4 Perspectives

L'utilisation d'images satellitaires et de données topographiques pour quantifier la déformation extensive a mis en évidence la nécessité de connaître les erreurs intrinsèques aux données utilisées (images, MNT ou mesures de terrain), ou les distorsions induites par le traitement de ces données, avant leur interprétation géologique. Ainsi, toutes les étapes de modélisation conduisant à la quantification de l'extension et au tracé des déplacements 2D ou 3D doivent être contrôlées par les données structurales (terrain ou images).

L'analyse de l'extension à l'échelle crustale, sur deux objets géologiques différents (Gregory Rift au Kenya et marge sud du Yémen) a été envisagée à partir de données satellitaires, topographiques et structurales. Elle contribue à fixer les limites d'utilisation des images satellitaires seules, lors de la quantification de la déformation fragile (Gregory Rift par exemple). L'utilisation combinée de ces données sur la marge sud du Yémen a permis de mettre au point une méthode de quantification de l'extension crustale et des déplacements associés. L'application de cette méthode à la déformation de la marge sud du Yémen permet d'en proposer un modèle et de définir ses limites de validité.

Cette étude montre l'importance de l'utilisation des données topographiques pour l'interprétation structurale des secteurs déformés et pour la quantification de cette déformation. L'application de la méthode développée ici à d'autres secteurs du Yémen doit permettre de compléter le modèle de déformation proposé, et de préciser ses limites de validité, avant son utilisation dans d'autres contextes.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- Abrams M.J., Rothery D.A. and Pontual A. (1988). Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics*. **151**, 387-401.
- Achauer U., Maguire P.M., Mechie J., Green W.V. and Group K.W. (1992). Some remarks on the structure and geodynamics of the Kenya rift. *Tectonophysics*. **213**, 257-268.
- Acton G.D., Stein S. and Engeln J.F. (1991). Block rotation and continental extension in Afar: a comparison to oceanic microplate systems. *Tectonics*. **10**, 501-526.
- Allemand P. (1988). Approche expérimentale de la mécanique du rifting continental. Rennes 1, **175 p.**
- Allemand P. and Brun J.-P. (1991). Width of continental rifts and reological layering of the lithosphere. *Tectonophysics*. **188**, 63-69.
- Allemand P., Brun J.-P., Davy P. and Van Der Driessche J. (1989). Symétrie et asymétrie des rifts et mécanismes d'amincissement de la lithosphère. *Bull. Soc. géol. France*. **8(V-3)**, 445-451.
- American Society of Photogrammetry (1983). "Manual of Remote Sensing." Falls Church, Virginia.
- Angelier J. (1983). Analyses qualitative et quantitative des populations de jeu de failles. *Bull. Soc. géol. France*. **7(XXV- 5)**, 661-672.
- Angelier J. and Manoussis S. (1980). Classification automatique et distinction des phases superposées en tectonique de failles. *C. R. Acad. Sci. France*. **D(288)**, 307-310.
- Angelier J. and Mechler P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales, également utilisable en tectonique et sismologie; la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. Fr.* **6**, 1309-1318.
- Armijo R., Carey E. and Cisternas A. (1982). The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases. *Tectonophysics*. **82**, 145-160.
- Arthaud F. (1969). Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bull. Soc. géol. France*. **XI**, 729-737.
- Audibert M. (1990). Déformation continue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. Application à la Galilée. Rennes 1, **218 p.**
- Bahat D. (1983). New aspects of rhomb structures. *J. Struc. Geol.* **5(6)**, 591-601.
- Baker B.H., Mohr P.A. and Williams L.A.J. (1972). Geology of the Eastern Rift System of Africa. *Geol. Soc. America. special paper n°136*, 67 pp.
- Baker B.H. and Wollenberg J. (1971). Structure and evolution of the Kenya Rift Valley. *Nature*. **229**, 538-542.
- Baker J., Briggs S.A., Gordon V., Jones A.R., Settle J.J., Townshend J.R.G. and Wyatt B.K. (1991). Advances in classification for land cover mapping using SPOT HRV imagery. *Int. J. Remote Sensing*. **12(5)**, 1071-1085.
- Bally A.W., Bernouilli D., Davis G.A. and Montadert L. (1981). Listric normal faults. *Oceanologica Acta. special paper*, 87-101.
- Bardinet C. (1988). Méthodes et réalisations en cartographie automatique des données satellitaires. *Bull. Soc. bel. Geol.* **97(2)**, 101-113.
- Bardinet C., Bossut P., Monget J.M. and Albuissou M. (1988). Hash coding analysis and IPM+Classification applied to Landsat TM data on the Karema Area (Tanzania). *Bull. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren (Belg.)*. **96**, 99-121.
- Bardinet C., Lavreau J., Le Page A., Roggeri I. and Trefois P. (1988). Image analysis and lithological classification of the Karema area, Tanzania, using Landsat TM data. *Bull. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren (Belg.)*. **96**, 79-98.
- Barr D. (1985). 3-D Palinstatic restoration of normal faults in the Inner Moray Firth: implications for extensional basin development. *Earth Planet. Sci. Lett.* **75**, 191-203.
- Bellier O., Sebrier M. and Pramumijoyo S. (1991). La grande faille de Sumatra : géométrie, cinématique et quantité de déplacement mises en évidence par l'imagerie satellitaire. *C. R. Acad. Sci. Paris. t.* **312(Série II)**, 1219-1226.
- Bénard F., Muller C., Letouzey J., Rangin C. and Tahir S. (1990). Evidence of multiphase deformation in the Rajang Crocker Range (northern Borneo) from Landsat imagery interpretation: geodynamic implications. *Tectonophysics*. **183**, 321-339.
- Berger Z., Williams T.H.L. and Anderson D.W. (1992). Geologic stereo mapping of geologic structures with SPOT satellite data. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* **76(1)**, 101-120.
- Berhe S.M. (1986). Geologic and geochronologic constraints on the evolution of the Red Sea-Gulf of Aden and Afar Depression. *J. Afr. Earth Sci.* **5(2)**, 101-117.
- Berhe S.M. and Rothery D.A. (1986). Interactive processing of satellite images for structural and lithological mapping in northeast Africa. *Geol. Mag.* **3(4)**, 393-403.
- Beslier M.O. (1990). Formation des marges passives et remontée du manteau. Modélisation expérimentale et exemple de la marge de Galice. Paris VI, **225 p.**
- Beydoun Z.R. (1970). Southern Arabia and northern Somalia: comparative geology. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* **A267**, 267-292.

- Bohannon R.G. (1986). Tectonic configuration of the western arabian continental margin, southern Red Sea. *Tectonics*. 5(n°4), 477-499.
- Bohannon R.G. (1989). Style of extensional tectonism during rifting, Red Sea, and Gulf of Aden. *J. Afr. Earth Sci.* 8, 589-602.
- Bosworth W. (1987). Off-axis volcanism in the Gregory rift, east Africa : Implications for models of continental rifting. *Geology*. 15, 397-400.
- Bosworth W. (1992). Mesozoic and early Tertiary rift tectonics in East Africa. *Tectonophysics*. 209, 115-137.
- Bosworth W., Lambiase J. and Keisler R. (1986). A new look at Gregory's rift: The structural style of continental rifting. *EOS, Trans. Am. geophys. Un.* 67(29), 577-582.
- Bosworth W., Strecker M.R. and Blisniuk P.M. (1992). Integration of East African paleostress and present-day stress data: Implications for continental stress field dynamics. *J. Geophys. Res.* 97, 11851-11865.
- Bott M.H. (1959). The Mechanics of Oblique Slip Faulting. *Geol. Mag.* 96(2), 109-117.
- Bott M.H.P. (1981). Crustal doming and the mechanism of continental rifting. *Tectonophysics*. 73, 1-8.
- Brun J.-P. and Choukroune P. (1983). Normal faulting, block tilting and decollement in a stretched crust. *Tectonics*. vol. 2 - n°4, 345-346.
- Brun J.-P., Choukroune P. and Faugères E. (1985). Les discontinuités significatives de l'amincissement crustal: application aux marges passives. *Bull. Soc. géol. France*. 8(I-1), 139-144.
- Capaldi G., Chiesa S., Conticelli S. and Manetti P. (1987a). Jabal An Nar: an upper miocene volcanic centre near Al Mukha (Yemen Arab Republic). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 31, 345-351.
- Capaldi G., Chiesa S., Manetti P., Orsi G. and Poli G. (1987b). Tertiary anorogenic granites of the western border of the Yemen Plateau. *Lithos*. 20, 433-444.
- Capaldi G., Manetti P., Piccardo G. and Poli G. (1987c). Nature and geodynamic significance of the miocene dyke swarm in the North Yemen (YAR). *N. Jahrb. Mineral.* 2, 207-229.
- Cardon H. (1992). Caractérisation multiéchelle de la géométrie d'un réseau de failles. I.N.P.- Grenoble, D.E.A., 48p.
- Carey E. (1979). Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. géol. dyn. géophys.* 21, 57-66.
- Carey E. and Brunier B. (1974). Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C.R. Acad. Sci. Paris*. D(279), 891-894.
- Carey-Gailhardis E. and Mercier J. (1987). A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquakes populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth Planet. Sci. Lett.* 82, 165-179.
- Castaing C. (1992). Post Pan-African tectonic evolution of South Malawi in relation to the Karoo and Recent East African Rift Systems. *Tectonophysics*. 191, 55-73.
- Chamignon C., Courboulès J., Chiaverini D., Djamdji J.P., Celles J.C. and Maniere R. (1990). Etablissement d'une spatiocarte adaptée à l'aménagement d'une zone littorale en République Arabe du Yemen d'après les données SPOT-1. *Photo-interpretation*. 3/4, 37-40.
- Chazot G. (1993). Evolution géochimique du magmatisme cénozoïque au Yémen: interactions entre le rift Mer Rouge-Aden et le point chaud Afar. Lyon1-ENS Lyon, Thèse 3ème cycle, 173 p.
- Chazot G., Bertrand H. and Féraud G. (1991). Le magmatisme tertiaire du Sud Yemen et le rifting Mer Rouge-Aden: évolution de magmas transitionnels par cristallisation fractionnée et contamination crustale. *C.R. Acad. Sci. Paris*. 312, 249-255.
- Chen W.P. and Molnar P. (1983). Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere. *J. Geophys. Res.* 88(B5), 4183-4214.
- Chenet P.-Y. and Letouzey J. (1983). Tectonique de la zone comprise entre Abu Durba et Gebel Mezzazat. *Bull. Centr. Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*. 7 - n°1, 201-215.
- Chiesa S., Civetta L., De Fino M., La Volpe L. and Orsi G. (1989). The Yemen Trap Series: genesis and evolution of a continental flood basalt province. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 36, 337-350.
- Chiesa S., La Volpe L., Lirer L. and Orsi G. (1983). Geological and structural outline of Yemen Plateau: Yemen Arab Republic. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.* 11, 641-656.
- Childs C., Walsh J. and Watterson J. (1990). "A method for estimation of the density of fault displacements below the limits of seismic resolution in reservoir formations." *North Sea Oil and Gas Reservoirs II*. N. I. o. Technology ed. Graham & Trotman. London.
- Chorowicz J. (1992). The role of ancient structures in the genesis and evolution of the East African Rift. *Bull. Soc. géol. France*. t 163(3), 217-227.
- Chorowicz J. and Deffontaines B. (1993). Transfert Faults and Pull-Apart Model in the Rhinegraben From Analysis of Multisource Data. *J. Geophys. Res.* 98(B8), 14339-14351.
- Chorowicz J., Guelzane M., Rudant J.-P. and Vidal G. (1988). Analyse de la zone de failles d'Assoua au Kenya à partir des images spatiales Landsat MSS et MOMS-01. Influence de l'héritage précambrien sur la structure du Gregory Rift. *C. R. Acad. Sci. Paris. tome 307 - série II*, 83-88.
- Chorowicz J., Le Fournier J. and Vidal G. (1987). A model for rift development in Eastern Africa. *Geol. J.* 22(Thematic issue : Geology of Africa), 495-513.
- Chorowicz J. and Mukonki M.N.B. (1980). Linéaments anciens, zones transformantes récentes et géotectonique des fossés de l'est africain, d'après la télédétection et la microtectonique. *Rapp. ann. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren (Belgique)*. *Rapp. ann.* 1979, 143-167.
- Chorowicz J. and Sorlien C. (1992). Oblique extensional tectonics in the Malawi Rift, Africa. *Geological Society of America Bulletin*. 104, 1015-1023.
- Chorowicz J. and Vidal G. (1989). Utilisation de l'imagerie SPOT et MOMS-01 pour l'analyse tectonique en contexte de limites de plaques : exemples du rift est-africain de la collision nord-caraïbe et des Andes de Colombie. *Bull. Soc. franc. Photogram. et Télédétection*.
- Choukroune P., Auvray B., Francheteau J., Lepine J.C., Arthaud F., Brun J.P., Auzende J.M., Sichler B. and Khobar Y. (1986). Tectonics of the westernmost Gulf of Aden and the Gulf of Tadjoura from submersible observations. *Nature*. 319, 396-399.
- Civetta L., La Volpe L. and Lirer L. (1978). K-Ar ages of the yemen plateau. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 4, 307-314.
- Cobbold P. and Percevault M.N. (1983). Spatial integration of strains using finite elements. *J. Struct. Geol.* 5, 299-305.
- Cobbold P.R. (1979). Removal of finite deformation using strain trajectories. *J. Struct. Geol.* 1(1), 67-72.
- Cobbold P.R., Brun J.P., Davy P., Fiquet G., Basile C. and Gapais D. (1989). "Some experiments on block rotation in the brittle upper crust." In: *Paleomagnetic Rotations and Continental Deformation*. C. Kissel and C. Laj eds.
- Cochran J.R. (1981). The Gulf of Aden: structure and evolution of a young ocean basin and continental margin. *J. Geophys. Res.* 86, 263-287.
- Coleman R.G., DeBari S. and Peterman Z. (1992). A-type granite and the Red Sea opening. *Tectonophysics*. 204, 27-40.
- Coleman R.G. and Mc Guire A.V. (1988). Magma systems related to the Red Sea opening. *Tectonophysics*. 150, 77-100.
- Coster M. and Chermant J.L. (1989). "Précis d'analyse d'images." CNRS édition. Paris.
- Courtillot V. (1982). Propagating rifts and continental break up. *Tectonics*. 1, 239-250.
- Coward M.P. (1986). Heterogeneous stretching, simple shear and basin development. *Earth Planet. Sci. Lett.* 80, 325-336.
- Cowie P. and Scholtz C.H. (1992a). Displacement-length scaling relationship for faults: data synthesis and discussion. *J. Struct. Geol.* 14(10), 1149-1156.
- Cowie P. and Scholtz C.H. (1992b). Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model. *J. Struct. Geol.* 14(10), 1133-1148.
- Cowie P.A. and Scholtz C.H. (1992c). Growth of faults by accumulation of seismic slip. *J. Geophys. Res.* 97, 11085-11096.
- Cox K.G., Gass I.G. and Mallick D.I.J. (1969). The evolution of the volcanoes of Aden and Little Aden, South Arabia. *Q. J. Geol. Soc. Lond.* 124, 283-308.
- Cox S.J.D. and Scholtz C.H. (1988). On the formation and growth of faults: an experimental study. *J. Struct. Geol.* 10(4), 413-430.
- Crane K. and Bonatti E. (1987). The role of fracture zones during early Red Sea rifting: structural analysis using Space Shuttle radar and LANDSAT imagery. *J. Geol. Soc. London*. 144, 407-420.
- Crippen R.E. (1992). Measurement of subresolution terrain displacements using SPOT panchromatic imagery. *Episodes*. 15(1), 56-61.
- Dahlheim H.A., Davis P. and Achauer U. (1989). Teleseismic investigation of the East African Rift - Kenya. *J. Afr. Earth Sc.* 8, 461-470.
- Dahlstrom C.D.A. (1969). Balanced cross-sections. *Can. J. Earth Sci.* 6, 743-757.
- Davison I. (1986). Listric normal fault profiles: calculation using bed-length balance and fault displacement. *J. Struct. Geol.* 8(2), 209-210.
- Davy P. and Cobbold P.R. (1988). Indentation tectonics in nature and experiment. 1. Experiments scaled for gravity. *Bull. Geol. Inst. Uppsala*. 14, 129-141.
- Davy P., Sornette A. and Sornette D. (1990). Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting. *Nature*. 348, 56-58.
- Davy P., Sornette A. and Sornette D. (1992). Experimental discovery of scaling laws relating fractal dimensions and the length distribution exponent of faults system. *Geophys. Res. Lett.* 19(4), 361-363.
- Dedieu J.P., Ducos B. and Reynaud L. (1992). "Intérêts de la télédétection spatiale pour le suivi du bilan de masse des glaciers; l'exemple des Alpes françaises et de la Cordillère Blanche (Pérou)." *Télédétection et Montagne*. Université J. Fourier. Grenoble.

- Delay F., Bracq P. and Colbeaux J.-P. (1992). Cartographie numérique de linéations morphostructurales: exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. *Bull. Soc. géol. France*. **163**(3), 345-352.
- DePaor D.G. (1988). Balanced sections in thrust belts. Part 1: Construction. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.* **72**, 73-90.
- Dixon T.H., Ivins E.R. and Franklin B.J. (1989). Topographic and volcanic asymmetry around the Red Sea: constraints on rift models. *Tectonics*. **8**(6), 1193-1216.
- Dixon T.H., Stern R.J. and Hussein I.M. (1987). Control of Red Sea rift geometry by Precambrian structures. *Tectonics*. **6**, 551-571.
- Dula W.F. (1991). Geometric Models of Listric Normal Faults and Rollover Folds. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* **75**(10), 1609-1625.
- Duyverman H.J., Harris N.B.W. and Hawkesworth C.J. (1982). Crustal accretion in the Pan African: Nd and Sr isotope evidence from the Arabian Shield. *Earth Planet. Sci. Lett.* **59**, 315-326.
- Ebinger C.J. (1989). Tectonic development of the western branch of the East African rift system. *Geol. Soc. Am. Bull.* **101**, 952-967.
- Ebinger C.J., Rosenthal B.R. and Reynolds D. (1987). Tectonic model of the Malawi Rift, Africa. *Tectonophysics*. **141**, 215-235.
- Engel A.E.J., Dixon T.H. and Stern R.J. (1980). Late Precambrian evolution of Afro-Arabian crust from ocean arc to craton. *Geol. Soc. Am. Bull.* **191**, 699-706.
- Etchecopar A. (1984). Etude des états de contrainte en tectonique cassante et simulation de déformations plastiques (approche mathématique). USTL, Thèse d'État, 235 p.
- Etchecopar A. and Mattauer M. (1988). Méthodes dynamiques d'analyse des populations de failles. *Bull. Soc. géol. France*. t. **IV**(2), 289-302.
- Etchecopar A., Vasseur G. and Daignières M. (1981). An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.* **3**(1), 51-55.
- Evans J.P. (1990). Thickness-displacement relationships for fault zones. *J. Struct. Geol.* **12**(8), 1061-1065.
- Fairhead J.D. and Girdler R.W. (1971). The Seismicity of Africa. *Geophys. J. R. astr. Soc.* **24**, 271-301.
- Fairhead J.D. and Henderson N.B. (1977). The Seismicity of southern Africa and incipient rifting. *Tectonophysics*. **41**, 19-26.
- Faugères E. (1985). La tectonique en extension intracontinentale: étude de terrain (Sud du Nevada, USA) et modélisation analogique. Paris VI, **194 p.**
- Faugères E. and Brun J.P. (1984). Modélisation expérimentale de la distension continentale. *C.R. Acad. Sci. Paris*. **299**(Série II), 365-370.
- Gapais D., Fiquet G. and Cobbold P.R. (1991). Slip system domains, 3. New insights in fault kinematics from plane-strain sandbox experiments. *Tectonophysics*. **188**, 143-157.
- Gass I.G. (1970). "Tectonic and magmatic evolution of the Afro-Arabian dome." *African Magmatism and Tectonics*. T. E. C. a. I. G. Gass ed. Oliver and Boyd. Edimburg.
- Gaulier J.M. and Huchon P. (1991). Tectonic evolution of Afar triple junction. *Bull. Soc. Géol. France*. t. **162**, 451-464.
- Gephart J.W. (1990). Stress and the direction of slip on fault planes. *Tectonics*. **9**(n°4), 845-858.
- Gephart J.W. and Forsyth D.W. (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.* **89**, 9305-9320.
- Geukens F. (1960). Contribution à la géologie du Yémen. *Mém. Inst. géol. Univ. Louvain*. **21**, 117-180.
- Gibbs A. (1984). Structural evolution of extensional basin margins. *J. geol. Soc. London*. **141**, 609-620.
- Gibbs A.D. (1983). Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *J. Struct. Geol.* **5**, 153-160.
- Gratier J.-P. and Guillier B. (1993). Compatibility constraints on folded and faulted strata and calculation of total displacement using computational restoration (UNFOLD program). *J. Struct. Geol.* **15**(3-5), 391-402.
- Gratier J.P. (1988). "L'équilibrage et la restauration en carte de couches plissées et faillées." *L'équilibrage des coupes géologiques: but, méthodes et applications*. CAESS Rennes ed.
- Gratier J.P., Guillier B., Delorme A. and Odonne F. (1991). Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements: principle and applications. *J. Struct. Geol.* **13**, 111-115.
- Gratier J.P., Ménard G. and Arpin R. (1989). "Strain-displacement compatibility and restoration of the Chaînes Subalpines of the Western Alps." In: *Alpine Tectonics*. M. P. Coward, D. Dietrich & Park, R.D. ed. *Geol. Soc. London*, **45**.
- Green W.V. and Meyer R.P. (1992). Array observations of PKP phases across Kenya Rift: implications for structure and tectonics. *Tectonophysics*. **204**, 41-58.
- Greenwood J.E.G.W. and Beackley D. (1967). Geology of the Arabian peninsula, Aden Protectorate. U.S.G.S Professional Paper. **560-C**, 1-95.
- Gregory J.W. (1921). "The Rift Valleys and geology of East Africa." Seeley, Service and Co., Ltd. London.
- Griffiths D.H. (1972). Some comments on the results of a seismic refraction experiment in the Kenya Rift. *Tectonophysics*. **15**(1-2), 151-156.
- Griffiths P.S. (1980). Box-fault systems and ramps: atypical associations of structures from the eastern shoulder of the Kenya Rift. *Geol. Mag.* **117**, 579-586.
- Grolier M.J. and Overstreet W.C. (1978). Geological map of the Yemen Arabic Republic (Sana'a). 1/250 000.
- Gudmunsson A. (1983). Stress estimates from the length/width ratios of fractures. *J. Struct. Geol.* **5**(6), 623-626.
- Guillier B. (1991). Dépliage automatique de strates plissées et faillées. Application à l'équilibrage de structures naturelles. Thèse 3ème cycle Grenoble 1, 160 p.
- Hempton M.R. (1987). Constraints on Arabian plate motion and extensional history of the Red Sea. *Tectonics*. **6**, 687-705.
- Henry W.J., Mechie J., Maguire P.K.H., Khan M.A., Prodehl C., Keller G.R. and Patel J. (1990). A seismic investigation of the Kenya Rift Valley. *Geophys. J. Int.* **100**, 107-130.
- Hossack J.R. (1979). The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review. *J. geol. Soc. London*. **136**, 705-711.
- Huchon P., Jestin F., Cantagrel J.M., Gaulier J.M., Al Khirbash S. and Gafaneh A. (1991). Extensional deformations in Yemen since Oligocene and the Africa-Arabia-Somalia triple junction. *Annales Tectonicae*. **5**(2), 141-163.
- Hunt G.R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophys.* **42**(3), 501-513.
- Hunt G.R., Salisbury J.W. and Lenhoff C. (1973). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. VIII. Intermediate Igneous Rocks. *Modern Geology*. **4**, 237-244.
- Hussein M.I. (1988). The Arabian Infracambrian extensional system. *Tectonophysics*. **148**, 93-103.
- Irving E. and Tarling D.H. (1961). The paleomagnetism of the Aden Volcanics. *J. Geophys. Res.* **66**(2), 549-556.
- Izzeldin A.Y. (1987). Seismic, gravity and magnetic surveys in the central part of the Red Sea: their interpretation and implications for the structure and evolution of the Red Sea. *Tectonophysics*. **143**, 269-306.
- Jackson J. and Mc Kenzie D. (1983). The geometrical evolution of normal fault systems. *J. Struct. Geol.* **5**(5), 471-482.
- Jestin F. and Huchon P. (1992). Cinématique et déformation de la jonction triple mer Rouge - golfe d'Aden - Rift éthiopien depuis l'Oligocène. *Bull. Soc. géol. Fr.* **163**(2),
- Jungwirth J. and As-Saruri M. (1990). Structural evolution of the platform cover on Southern Arabian Peninsula (P.D.R. Yemen). *Z. geol. Wiss. Berlin*. **6**, 505-514.
- Karson J.A. and Curtis P.C. (1989). Tectonic and magmatic processes in the Eastern Branch of East African Rift and implications for magmatically active continental rifts. *J. Afr. Earth Sc.* **8**, 431-453.
- Kellog K.S. and Reynolds R.L. (1983). Opening of the Red Sea: constraints from a palaeomagnetic study of the As Sarat volcanic field, south-western Saudi Arabia. *Geophys. J. R. astr. Soc.* **74**, 649-665.
- Khan M.A., Maguire P.K.H., Henry W., Higham M., Prodehl C., Mechie J., Keller G.R. and Patel J. (1989). A crustal seismic refraction line along the axis of S. Kenya Rift. *J. Afr. Earth Sc.* **8**, 455-460.
- Kranz R.L. (1983). Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*. **100**, 449-480.
- KRISP (1987). Structure of the Kenya rift from seismic refraction. *Nature*. **325**, 239-242.
- KRISP w.p. (1991). Large-scale variation in lithospheric structure along and across the Kenya rift. *Nature*. **354**, 223-227.
- Kronberg P. (1991). Crustal fracturing and intraplate tectonics in the area between the North Sea and the Alps: A comparison of Landsat-derived fractures with existing map data. *Tectonophysics*. **195**, 261-269.
- Kronberg P. (1991). Geometries of extensional fault systems, observed and mapped on aerial and satellite photographs of Central Afar (Ethiopia/Djibouti). *Geol. en Mijnbouw*. **70**, 145-161.
- Lamare P. (1930). Etudes géologiques en Ethiopie, Somalie, et Arabie Méridionale. *Bull. Soc. géol. France*. **6**, 21-83.
- Launeau P., Bouchez J.L. and Benn K. (1990). Shape preferred orientation of object populations: automatic analysis of digitized images. *Tectonophysics*. **180**(201-211),
- LeMéhauté A. (1990). "Les géométries fractales." Hermès Ed. Paris.
- LePichon X. and Francheteau J. (1978). A plate-tectonic analysis of the Red Sea - Gulf of Aden area. *Tectonophysics*. **46**, 369-406.
- LePichon X. and Gaulier J.M. (1988). The rotation of Arabia and the Levant fault system. *Tectonophysics*. **153**, 271-274.

- Lister G.S., Eltheridge M.A. and Symonds P.A. (1991). Detachment models for the formation of passive continental margins. *Tectonics*, 10(5), 1038-1064.
- Long R.E. and Backhouse R.W. (1976). The structure of the western flank of the Gregory Rift. Part II. The Mantle. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 44, 677-688.
- Maguire P.K.H. and Long R.E. (1976). The structure on the western flank of the Gregory Rift (Kenya). Part I. the crust. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 44, 661-675.
- Mallick D.I.J., Gass I.G., Cox K.G., DeVries B.W. and Tindle A.G. (1990). Perim Island, a volcanic remnant in the southern entrance to the Red Sea. *Geol. Mag.* 127, 309-318.
- Manetti P., Capaldi G., Chiesa S., Civetta L., Conticelli S., Gasparon M., La Volpe L. and Orsi G. (1991). Magmatism of the eastern Red Sea margin in the northern part of Yemen from Oligocene to present. *Tectonophysics*, 198, 181-202.
- Marrett R. and Allmendinger R.W. (1992). Amount of extension on "small" faults: An example from the Viking graben. *Geology*, 20(1),
- Martelat J.-E. (1993). Les structures crustales du Sud-Ouest de Madagascar: cinématique et métamorphisme associés. Clermont-Ferrand II, DEA, 55 p.
- Matsumoto N., Yomogida K. and Honda S. (1991). Fractal analysis of faults systems in Japan and the Philippines. *Geophys. Res. Lett.* 19(4), 357-360.
- McCall G.J.H. (1967). Geology of the Nakuru-Thompson's Falls- Lake Hannington area. **Report 78**, Geol. Surv. Kenya.
- McConnell R.B. (1980). A resurgent taphrogenic lineament of Precambrian origin in eastern Africa. *J. geol. Soc. London*, 137, 483-489.
- McKenzie D. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet. Sci. Lett.* 40, 25-32.
- McKenzie D.P., Davies D. and Molnar P. (1970). Plate tectonics of the Red Sea and East Africa. *Nature*, 226, 243-248.
- McKenzie D.P. and Morgan W.J. (1969). Evolution of the triple junctions. *Nature*, 224, 125-133.
- Mégier J., Hill J. and Kohl H. (1991). Land-use inventory and mapping in a mountainous area: the Ardèche experiment. *Int. J. Remote Sensing*, 12(3), 445-462.
- Mémier M. (1991). Stéréophotogrammétrie numérique : calcul de MNT par corrélation automatique d'images SPOT. Thèse 3ème cycle, Grenoble 1, 154 p.
- Mémier M. (1992). "Calcul automatique d'un modèle numérique de terrain en zone de montagne à partir d'un couple stéréoscopique SPOT." Télédétection et Montagne. Université J. Fourier. Grenoble.
- Ménard G. (1987). Structure et cinématique d'une chaîne de collision: les Alpes occidentales et centrales. Grenoble 1, Thèse d'Etat, 260 p.
- Menzies M., Bosence D., El-Nakhal H.A., Al-Khribash S., Al-Kadasi M. and Al Subbary A. (1990). Lithospheric extension and the opening of the Red Sea: sediment-basalt relationships in Yemen. *Terra Nova*, 2, 340-350.
- Menzies M.A., Baker J., Bosence D., Dart C., Davidson I., Hurford A., Al'Kadasi M., McClay K., Nichols G., Al'Subbary A. and Yelland A. (1992). "The timing of magmatism, uplift and crustal extension: preliminary observations from Yemen." In: *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. B.C. Storey, T. Alabaster and R. J. Pankhurst eds. Geol. Soc. London, 68, 293-304.
- Merceron T., Velde B., Nakashima S., Badri A. and Touchard G. (1991). "Fractal Analysis of Fractures and Microstructures in Rocks." *Geosciences and Radionuclide Migration*. JAERI ed. Hito, Japan.
- Michael A.J. (1984). Determination of stress from slip data: Faults and Folds. *J. Geophys. Res.* 89(B13), 11517-11526.
- Michael A.J. (1987). Stress rotation during the Coalinga Aftershock Sequence. *J. Geophys. Res.* 92(B8), 7963-7979.
- Mohr P. (1962). The Ethiopian rift system. *Geophys. Observ. Addis Ababa Bull.* 5, 33.
- Mohr P. (1987). Structural style of continental rifting in Ethiopia: reverse decollement. *E.O.S. Trans. AGU*, 68, 721-723.
- Mohr P. (1991). Structure of Yemeni Miocene dyle swarms, and emplacement of coeval granite plutons. *Tectonophysics*, 198, 203-221.
- Mooney W.D., Gettings M.E., Blank H.R. and Healy J.H. (1985). Saudi arabian seismic-refraction profile: a travelttime interpretation of crustal and upper mantle structure. *Tectonophysics*, 11, 173-246.
- Moretti I. and Larrere M. (1989). LOCACE: computer-aided construction of balanced geological cross-sections. *Geobyte*, 10, 16-24.
- Morley C.K. (1989). Extension, detachments and sedimentation in continental rifts (with particular reference to East Africa). *Tectonics*, 8(6), 1175-1192.
- Morley C.K., Nelson R.A., Patton T.L. and Munn S.G. (1990). Transfer zones in the East African Rift System and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 74(8), 1234-1258.
- Morley C.K., Wescott W.A., Stone D.M., Harper R.M., Wigger S.T. and Karanja F.M. (1992). Tectonic evolution of the northern Kenyan Rift. *J. geol. Soc. London*, 149, 333-348.
- Moseley F. (1969). The Aden traps of Dhala, Musaymir and Radfan, South Yemen. *Bull. Volcanol.* 33, 889-909.
- Mugnier J.L., Arpin R. and Thouvenot F. (1987). Coupes équilibrées à travers le massif subalpin de la Chartreuse. *Geodinamica Acta*, 1(2), 125-137.
- Muller J.P. (1988). "Digital Image Processing in Remote Sensing." Taylor & Francis. London.
- Muller J.P., Day T. and Kolbulsz J. (1988). "Visualisation of topographic data using video animation." *Digital Image Processing in Remote Sensing*. J. P. Muller ed. Taylor & Francis. Londres.
- Mutter J.C., Buck W.R. and Zehnder C.M. (1988). Convective partial melting-1. A model for the formation of thick basaltic sequences during the initiation of spreading. *J. Geophys. Res.* 93(B2), 1031-1048.
- Nunns A.G. (1991). Structural Restoration of Seismic and Geologic Sections in Extensional Regimes. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 75(2), 278-297.
- Nur A. (1982). The origin of tensile fracture lineaments. *J. Struc. Geol.* 4(1), 31-40.
- Oertel G. and Ernst W.G. (1978). Strain and rotation in a multilayered fold. *Tectonophysics*, 48, 77-106.
- Pallister J.S. (1987). Magmatic history of Red Sea rifting: perspective from the central Saudi Arabian coastal plain. *Geol. Soc. Am. Bull.* 98, 400-417.
- Peltzer G., Tapponier P. and Amijo R. (1989). Magnitude of Late Quaternary Left-Lateral Displacements Along the North Edge of Tibet. *Science*, 246, 1285-1289.
- Percevault M.N. and Cobbold P.R. (1982). Mathematical removal of regional ductile strains in Central Brittany: evidences for wrench tectonics. *Tectonophysics*, 82, 317-328.
- Petit J.P., Proust F. and Tapponier P. (1983). Critères de sens de mouvement sur les miroirs de failles en roches non-calcaires. *Bull. Soc. géol. France*, t. XXV(4), 589-608.
- Piper D.J. (1989). Lineament analysis of the environs of the Malawirift and the influence of pre-existing structures on rift morphology. *J. Afr. Earth Sci.* 9(3/4), 579-587.
- Pratt W.K. (1978). "Digital image processing." J. WILEY & sons. New York.
- Ramsay J.G. and Huber M.I. (1983). "The Techniques of Modern Structural Geology. 1- Strain analysis." Academic Press. London.
- Ramsay J.G. and Huber M.I. (1987). "The Techniques of Modern Structural Geology. 2- Folds and Fractures." Academic Press. London.
- Ranalli G. (1977). Correlation between length and offset on strike-slip faults. *Tectonophysics*, 37, 1-7.
- Rees W.G. (1990). "Data Processing." *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Reynes P., Rolet J., Richert J.-P., Gruneisen P., Palengat J.-M. and Coquelet D. (1993). Apports des techniques 3D de la télédétection dans la recherche des blocs basculés du fossé Nord-Tanganyika, Rift est-africain, Zaïre. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 17(1), 1-17.
- Richards J.A. (1986). "Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction." Berlin.
- Ring U., Betzler C. and Delvaux D. (1992). Normal vs. strike-slip faulting during rift development in East Africa: The Malawi rift. *Geology*, 20, 1045-1018.
- Rolet J., Mondeguer A., Bouroullec J.L., Bandora T., Coussement C., Rehault J.P. and Tiercelin J.J. (1991). Structure and different kinematic development faults along the Lake Tanganyika Rift Valley (East African Rift System). *Bull. Centr. Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 15(2), 327-342.
- Rolet J. and Yesou H. (1990). Apport de l'imagerie SPOT à la reconnaissance en pays couvert de plans de cisaillement C et de schistosité S. Le cas du Cisaillement Sud Armoricaïn (France). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 311(série II), 1075-1080.
- Ron H., Freud R., Garfunkel Z. and Nur A. (1984). Block rotation by strike-slip faulting: structural and paleomagnetic evidence. *J. Geophys. Res.* 89(B7), 6256-6270.
- Rosendahl B.R., Kilembe E. and Kaczmarick K. (1992). Comparison of the Tanganyika, Malawi, Rukwa and Turkana Rift zones from analyses of seismic reflection data. *Tectonophysics*, 213, 235-256.
- Rosendahl B.R. (1987). Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.* 15, 445-503.
- Rosendahl B.R., Reynolds P.M., Lorber P.M., Burgess C.F., Mc Cill J., Scott D., Lambiasi J.J. and Derksen S.J. (1986). "Structural expressions of rifting: lessons from Lake Tanganyika, Africa." In: *Sedimentation in the African Rifts*, Geol. Soc. London, **special paper 45**.
- Rothery D.A. (1987). Improved discrimination of rock units using Landsat Thematic Mapper imagery of the Oman ophiolite. *J. Geol. Soc. London*, 144, 587-597.
- Rouby D., Cobbold P.R., Szatmari P., Demercian S., Coelho D. and Rici J.A. (1993). Least-squares palinspatic restoration of regions of normal faulting-application to the Campos basin (Brazil). *Tectonophysics*, 221, 439-452.
- Rowan L.C., Goetz A.F. and Ashley R.P. (1977). Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophys.* 42(3), 522-538.

- Ruesch S. and Laureo L. (1990). Extraction de modèles numériques de terrain par corrélation sur des couples d'images stéréoscopiques SPOT. Photo-interpretation. 3/4, 33-36.
- Sander S. and Rosendahl B.R. (1989). The geometry of rifting in Lake Tanganyika, East Africa. *J. Afr. Earth Sci.* 8, 323-354.
- Schaaf A. and Vansteelant M.L. (1988). La complexité morphologique linéaire en géologie : comment la caractériser, comment la quantifier ? *Sci. Geol. Bull.* 41(2), 125-133.
- Scholtz C.H. (1987). Wear and gouge formation in brittle faulting. *Geology*. 15, 493-495.
- Scholtz C.H. and Cowie P.A. (1990). Determination of total strain from faulting using slip measurements. *Nature*. 346, 837-838.
- Schultz-Ela D.D. (1988). Application of a three dimensional finite-element method of strain field analyses. *J. Struct. Geol.* 10, 263-272.
- Schwerdtner W.M. (1977). Geometric interpretation of regional strain analysis. *Tectonophysics*. 39, 515-531.
- Segall P. and Pollard D.D. (1990). Mechanics of Discontinuous Faults. *J. Geophys. Res.* 85(B8), 4337-4350.
- Sengör A.M.C. and Burke K. (1978). Relative timing of rifting and volcanism on earth and its tectonic implications. *Geophys. Res. Lett.* 5, 419-421.
- Simeakis C., Mercier J.L., Vergely P. and Kissel C. (1989). "Late cenozoic rotations along the North Aegean trough fault zone (Greece); structural constraints." In: *Paleomagnetic Rotations and Continental Deformation*. C. Kissel and C. Laj eds.
- Smith M. and Mosley P. (1993). Crustal heterogeneity and basement influence on the development of the Kenya Rift, East Africa. *Tectonics*. 12(2), 591-606.
- Smith W.H.F. and Wessel P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophys.* 55, 293-305.
- Sornette D. and Davy P. (1991). Fault Growth and the Universal Fault Length Distribution. *Geophys. Res. Lett.* 18(6), 1079-1081.
- Souriot T. (1992). Cinématique de l'extension Post-Pliocène en Afar. *Imagerie SPOT et modélisation analogique*. Rennes 1, 197 p.
- Souriot T. and Brun J.P. (1992). Faulting and block rotation in the Afar triangle, East-Africa: The Danakil "crank-arm" model. *Geology*. 20, 911-914.
- Specht T.D. and Rosendahl B.R. (1989). Architecture of the Lake Malawi Rift, East Africa. *J. Afr. Earth Sci.* 8, 355-382.
- SPOT-IMAGE (1989). "Images à la carte." Spot Image Diffusion. Toulouse.
- SPOT-IMAGE (1989). "La grille de référence SPOT." Spot Image Diffusion. Toulouse.
- Strecker M.R., Blisniuk P.M. and Eisbacher G.H. (1990). Rotation of extension direction in the central Kenya rift. *Geology*. 18, 299-302.
- Swain C.J., Khan M.A., Wilton T.J., Maguire P.K.H. and Griffiths D.H. (1981). Seismic and gravity surveys in the Lake Baringo-Tugen Hills area, Kenya Rift Valley. *J. geol. Soc. London*. 138, 93-102.
- Tard F., Masse P., Walgenwitz F. and Gruneisen P. (1991). The volcanic passive margin in the vicinity of Aden, Yemen. *Bull. Centr. Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*. 15(1), 1-9.
- Tarling D.H., Sanver M. and Hutchings A.M.J. (1967). Further paleomagnetic results from the Federation of South Arabia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2, 148-154.
- Thoué F. and Vidal G. (1993). Quantification par télédétection de la déformation finie associée à la tectonique extensive au Yémen. *Bull. Soc. fr. Photogram. Télédétection*. 129, 9-16.
- Tiercelin J.-J. and Vincens A. (1987). "Le demi graben de Baringo - Bogoria - Rift Gregory - Kenya." *Bull. Centres Rech. Explor. -Prod. Elf-Aquitaine*. 11(2), 249-540.
- Townshend J.R.G. (1981). "Terrain analysis and Remote Sensing." G. ALLEN & UNWIN LTD. London.
- Tréfois P. (1988). Correlation analysis and principal component imagery of thematic mapper scene as an aid to geological interpretation in the Karema Region (western Tanzania). *Bull. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren (Belg.)*. 96, 149-157.
- Tron V. and Brun J.-P. (1991). Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems. *Tectonophysics*. 188, 71-84.
- Turcotte D.L. and Emerman S.H. (1983). Mechanisms of active and passive rifting. *Tectonophysics*. 94, 39-50.
- Velde B., Dubois J., Moore D. and Touchard G. (1991). Fractal pattern of fractures in granites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 104(25-35),
- Velde B., Dubois J., Touchard G. and Badri A. (1990). Fractal analysis of fractures in rocks : the Cantor's Dust method. *Tectonophysics*. 179, 345-352.
- Verney-Green W., Achauer U. and Meyer R.P. (1991). A three-dimensional seismic image of the crust and upper mantle beneath the Kenya rift. *Nature*. 354, 199-203.
- Vidal G. (1985). Analyse par télédétection et étude de terrain du rift est-africain au Kenya : le problème du linéament d'Assoua. Paris VI, Thèse 3ème cycle, 262 p.
- Vidal G. (1987). Characteristics of the Gregory Rift (Kenya): Dynamics, Ground Structural Analysis and Remote Sensing. *Acta Astronautica*. 15(n°6/7), 313-319.
- Vidal G., Cardon H. and Thoué F. (1993). Multiscale geometrical properties of the Gregory Rift fault pattern: Implications on rift growth. *Terra Nova Abstract*. 5, p 179.
- Vignes-Adler M., Le Page A. and Adler P.M. (1991). Fractal analysis of fracturing in two African regions, from satellite imagery to ground scale. *Tectonophysics*. 196, 69-86.
- Villemin T. (1987). Comparaison des densités de fracturation à différentes échelles: exemple du bassin houiller lorrain. *Geodynamica Acta*. 1(2), 147-157.
- Villemin T. and Sunwoo C. (1987). Distribution logarithmique self-similaire des rejets et longueurs de failles: exemple du Bassin Houiller Lorrain. *C.R. Acad. Sci. Paris. t. 305 Série II*, 1309-1312.
- Wallace R.E. (1951). Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J. Geol.* 59, 118-130.
- Walsh J. (1969). Geology of the Eldama ravine - Kabarnet area. **Report 83**, Geol. Surv. Kenya.
- Walsh J. and Watterson J. (1992). Populations of faults and fault displacements and their effects on estimates of fault-related regional extension. *J. Struct. Geol.* 14(6), 701-712.
- Walsh J., Watterson J. and Yielding G. (1991). The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*. 351(6325), 391-393.
- Wernicke B. (1985). Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere. *Canad. J. Earth Sci.* 22, 108-125.
- Wernicke B. and Burchfield B.C. (1982). Modes of extensional tectonics. *J. Struct. Geol.* vol. 4 - n°2, 105-115.
- Wessel P. and Smith W.H.F. (1991). Free software helps map and display data. *EOS Trans. AGU*. 72(441), 445-446.
- White R. and Mc Kenzie D. (1989). Magmatism at Rift Zones: The Generation of Volcanic Continental Margins and Flood Basalts. *J. Geophys. Res.* 94(B6), 7685-7729.
- Withjack M.O. and Jamison W.R. (1986). Deformation produced by oblique rifting. *Tectonophysics*. 126, 99-124.
- Woldegabriel G., Aronson J.L. and Walter R.C. (1990). Geology, geochronology and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopia Rift. *Geol. Soc. Am. Bull.* 102, 439-458.
- Xiao H. and Suppe J. (1992). Origin of Rollover. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 76(4), 509-529.
- Zumbo V., Féraud G., Bertrand H. and Chazot G. (soumis). 40Ar-39Ar chronology of magmatic activity in Southern Yemen during the early Red Sea - Aden rifting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*

ANNEXES

ANNEXE 1 :

Liste des programmes "C" utilisés

bascul

Programme de "débasculément" de surfaces planes pentées.

Usage : bascul filein.xyz fileout.xy0 direction_ligne_pente pendage

barycalc

Programme de calcul du barycentre de chaque bloc basculé en fonction de ses coordonnées XY, et du nombre de points qui le composent.

Usage : barycalc file.dat file.par fileout

caraplan

Programme de calcul de l'orientation d'un plan (direction et pendage), en fonction des coefficients de son équation (contenus dans le fichier paramfile). Il fournit un fichier au format utilisable par ONNET et VPLOT (visualisation de stéréogrammes).

Usage : caraplan paramfile fileout plotfile type_of_plot(0=poles, 1=planes, 2=both)

carastrie

Programme de calcul de l'orientation de stries mesurées sur les images satellitaires, à partir des coefficients de l'équation des plans porteurs (fichier paramfile), des coordonnées XYZ des extrémités de chaque strie dans l'état déformé (fichier file.marq) et de l'orientation des plans porteurs au format VPLOT (fichier file.struct). Il fournit un fichier directement utilisable par le programme d'inversion STRESS.

Usage : carastrie paramfile file.marq file.struct fileout

cont2clean

Programme de lissage du contour de la surface dépliée fournie par le programme UNFOLD.

Usage : cont2clean filein.xy fileout.xy

creatorthoi

Programme de création de l'ortho-image à partir du MNT correspondant. Il fournit un fichier de pixels repérés par leurs coordonnées en XY et R (radiométrie).

Usage : creatorthoi filein.xypq filein.im fileout.xyr
nbcolim nblinim minp(int) maxq(int)

creatsection

Programme de tracé automatique de coupes rectilignes entre deux points A et B, par calcul des coordonnées XY. Le fichier paramfile contient les paramètres de calcul sous la forme :

xA yA xB yB pas

Usage : creatsection paramfile fileout.xy

formchamps

Programme de calcul des déplacements 2D entre la configuration déformée (file2.xy) et la configuration restaurée (file1.xy), en fonction de la position de chaque bloc dans les deux fichiers (file.order).

Usage : formchamps file1.xy file1.par file2.xy file2.par file.order fileout

gmt2island

Programme de formattage de fichiers de coordonnées XYZ en un fichier pouvant être importé par le logiciel de manipulation d'objets vectoriels IslandDraw.

Usage : gmt2island filein.xy fileout scale

init2cont

Programme de calcul du contour de la surface initiale discrétisée en triangles par le programme UNFOLD.

Usage : init2cont filein.xy fileout.xy

island2xy

Programme de formattage de fichiers exportés depuis IslandDraw, en fichiers de coordonnées XY. Il permet de transformer le dessin de l'ajustement des blocs sous IslandDraw en un fichier de coordonnées XY pour chaque bloc (fileout) et un fichier contenant le nombre de points composant chaque bloc (file.par).

Usage : island2xy filein.draw nblocs fileout.xy file.par

iterate

Programme de calcul de la dimension fractale d'un réseau de failles caractérisées par leur longueur exprimée sous forme matricielle (nblin X nbcol), pour une taille de jauge donnée (nbcarre).

Usage : iterate filein fileout nbcarre nblin nbcol

marqalc

Programme de calcul des coordonnées des marqueurs homologues dans l'état initial, sur le contour de chaque bloc, en fonction des coordonnées des marqueurs initiaux (file.marq), de l'ordre des blocs dans le fichier (configfile), des coordonnées du contour des blocs dans l'état initial (file.aju).

Usage : marqalc file.marq configfile file.aju file.par file.ord fileout

mntm2f3

Programme de formattage du MNT brut (XYPQZ) en un fichier de floats en coordonnées XYZ.

Usage : mntm2f3 filein fileout pas

mntm2i3

Programme de formattage du MNT brut (XYPQZ) en un fichier d'entiers en coordonnées PQZ, avec utilisation des altitudes comprises entre deux bornes choisies.

Usage : mntm2i3 filein fileout pas minheight maxheight

mntmcorrect

Programme de correction des erreurs d'altitudes sur le MNT brut (XYPQZ), à l'intérieur d'une fenêtre, en fonction des altitudes contenues dans une fenêtre plus grande. Les coordonnées de ces deux fenêtres sont contenues dans le fichier "paramfile":

minXi maxXi minYi maxYi minXf maxXf minYf minYf

Usage : mntmcorrect filein.xypqz nbpoints fileout.xypqz paramfile

mntmcut

Programme d'extraction de fenêtre à l'intérieur d'un MNT (fichiers XYZ ou PQZ).

Usage : mntmcut filein fileout Xmin Xmax Ymin Ymax

mntmform

Programme de formattage du MNT brut codé en binaire en un fichier au format ascii. Il fournit un fichier ascii de floats XYZ et un fichier ascii d'entiers PQZ.

Usage : mntmform filein fileout.pqz > fileout.xyz

mvtfaille

Programme de calcul des coordonnées XYZ des déplacements 3D entre état initial et état final, en fonction des coordonnées XY des marqueurs dans l'état initial (aju.xy), des coordonnées XYZ dans l'état final (def.xy), des coordonnées des marqueurs dans l'état initial (file.marq) et de l'ordre des blocs dans ce fichier (file.config).

Usage : mvtfaille file.marq file.config aju.xy aju.par aju.ord
def.xyz def.par def.ord nb_bloc fileout

n1a2n1b

Programme de transformation d'une image SPOT de niveau 1A (panchro ou XS) en image de niveau 1B.

Usage : n1a2n1b fichier_in fichier_out

orthogrid

Programme de calage d'une image satellitaire sur la géométrie du MNT correspondant, par recalcul des coordonnées PQ de l'image, en fonction des paramètres de calcul du MNT.

Usage : orthogrid filemnt.xyz fileortho.xypq

regplanf

Programme de calcul d'une régression plane à partir d'un fichier de points XYZ. Il fournit l'erreur d'estimation en altitude (Z), le coefficient de régression, les coefficients de l'équation du plan et les coordonnées recalculées des points initiaux.

Usage : regplanf filein.xyz nbpoints

rotcalc

Programme de calcul du champ de déplacement cumulé minimum pour plusieurs rotations des configurations déformée et restaurée l'une par rapport à l'autre, par pas successifs en degrés (step) et entre deux bornes limites (amplitude).

Usage : rotcalc filein fileout scale step(float) amplitude(float)

rotdef

Programme de calcul de la rotation autour d'axes verticaux des blocs basculés, en fonction des coordonnées des points de contour de chaque bloc (file.xy), des coordonnées du barycentre de chaque bloc (baryfile)

Usage : rotdef file.xy baryfile paramfile nblocs fileout

rotsurf

Programme de rotation des coordonnées de surfaces modélisées par rapport à un axe horizontal ou vertical.

Usage : rotsurf filein.xy maxX maxY fileout.xy (0=axe vertical; 1=axe horizontal)

superpose

Programme de superposition de la configuration déformée (file2.xy) sur la configuration restaurée (file1.xy), en fonction d'un référentiel donné (pt1 et pt2), et de sa position dans chaque fichier (order1 et order2).

Usage : superpose file1.xy file1.par order1 file2.xy file2.par order2 pt1 pt2 fileout

visurf

Programme de visualisation d'une grille de valeurs ascii (de taille nbcarrew X nbcarreh) en pixels en niveaux de gris (de taille nbpx).

Usage : visurf filein fileout nbpx nbcarrew nbcarreh

xyz2v3d

Programme de formatage d'une image (XYR) en pixels codés sur un octet ou d'un MNT (XYZ) en altitudes codées sur deux octets.

Usage : xyz2v3d filein.xyz header_size fileout flag(1 for image, 2 for DTE) scaling_factor

zcalc

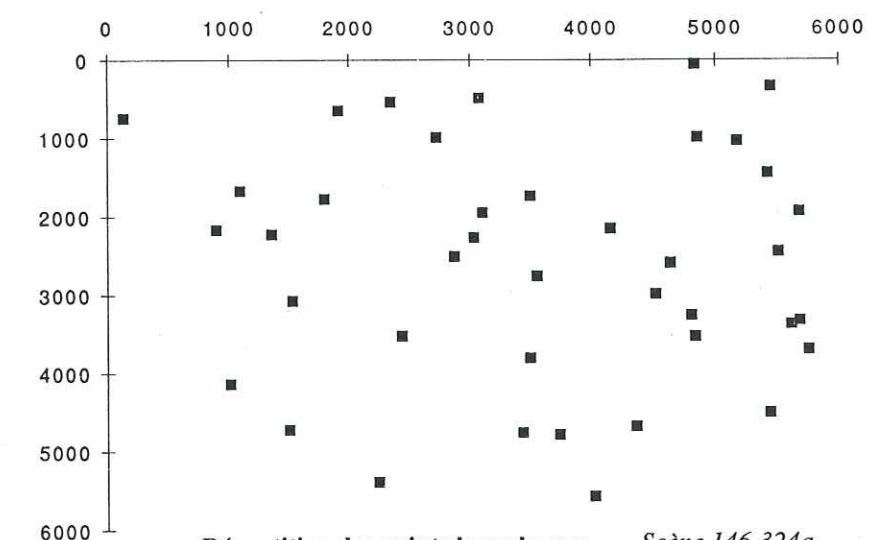
Programme de modélisation de surfaces planes grillées, à partir des coefficients de l'équation du plan, des coordonnées XYX de la surface dans le repère du MNT, du pas de la grille et des coordonnées XmYmZm du marqueur "falaise".

zcalc a b c xmin xmax ymin ymax step Xm Ym Zm fileout.xyz

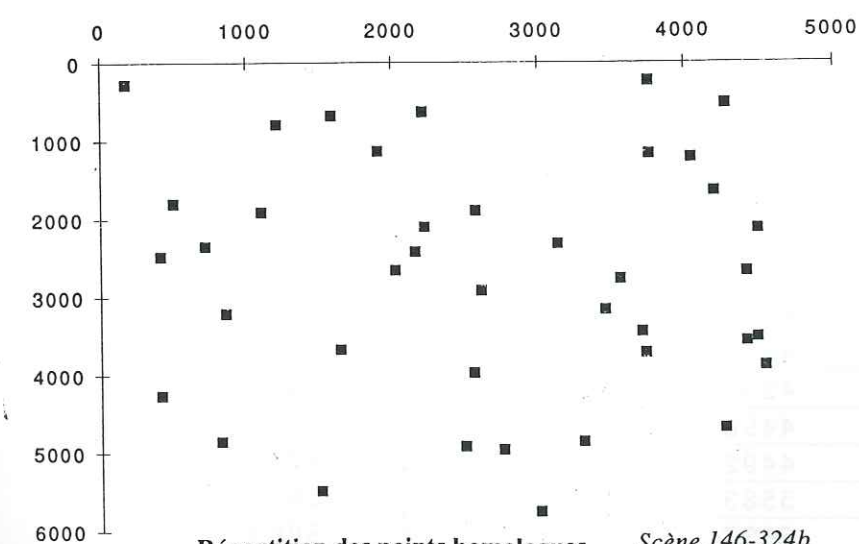
ANNEXE 2 :**Coordonnées des points homologues utilisés
dans le calcul des MNT****1- secteur de Umm Shatt****2- secteur de Ba'tays**

Scène 146-324a - IMAGE 1		Scène 146-324b - IMAGE 2	
19-05-1988		02-12-1988	
Ligne	Colonne	Ligne	Colonne
4511	5443	4700	4266
3701	5755	3897	4540
3377	5614	3570	4414
2448	5513	2684	4413
1032	5179	1215	4047
4682	4363	4858	3310
3534	4839	3714	3737
2988	4522	3164	3458
986	4857	1166	3764
2147	4155	2317	3140
5393	2249	5495	1505
3524	2441	3669	1643
2506	2873	2656	2024
1946	3105	2098	2228
988	2727	1134	1908
4138	1014	4259	415
3074	1527	3205	861
2223	1353	2352	718
1775	1798	1908	1103
648	1912	782	1209
742	133	278	175
2166	897	2487	413
4786	3741	4953	2763
3332	5683	3526	4485
1444	5424	1643	4200
3810	3501	3972	2560
4761	3440	4919	2502
2590	4639	2768	3562
2268	3034	2422	2163
2759	3555	2920	2613
1731	3505	1889	2576
481	3079	631	2216
538	2352	678	1588
1672	1096	1794	503
4726	1501	4858	826
5577	4028	5746	3010
3261	4811	3442	3712
1934	5681	2126	4493
55	4841	235	3760
340	5449	526	4277

Scène 146-324a - IMAGE 1		Scène 146-324b - IMAGE 2		
19-05-1988		02-12-1988		
Ligne	Colonne	Ligne	Colonne	Altitude (m)
3147	1598	3265	928	331
5393	2249	5495	1505	0
2911	4598	3088	3517	796
1668	4828	1870	3877	1250
80	3916	243	2947	904
Coordonnées géographiques des points altimétriques				
	X (m)	Y(m)	Z (m)	
	34250	39750	331	
	35500	16500	0	
	61250	35500	796	
	70500	47000	1250	
	57750	63250	904	



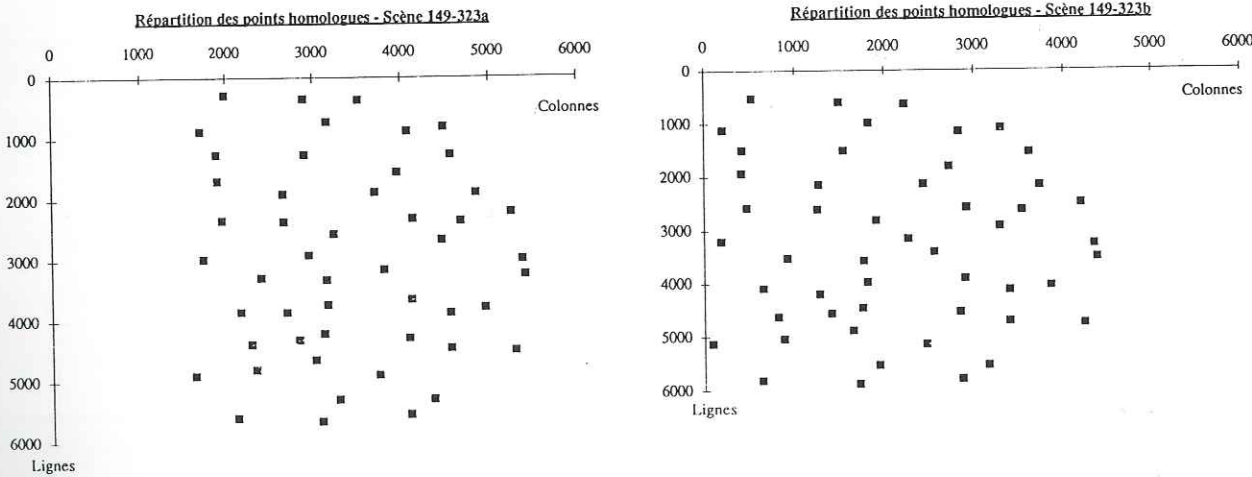
Répartition des points homologues *Scène 146-324a*



Répartition des points homologues *Scène 146-324b*

Scène 149-323a - IMAGE 1		Scène 149-323b - IMAGE 2	
31-07-1987		03-12-1990	
Colonne	Ligne	Colonne	Ligne
1989	288	526	524
1702	887	205	1118
3159	728	1818	984
2896	350	1493	600
4071	889	2833	1159
3517	374	2227	636
4484	817	3302	1096
1891	1269	416	1502
1901	1700	409	1935
2905	1264	1540	1516
2655	1306	1264	2152
3956	1554	2721	1822
3700	1883	2431	2148
4561	1274	3618	1558
4849	1897	3731	2182
1954	2343	466	2576
1729	2984	186	3210
2664	2360	1251	2606
3227	2561	1904	2816
2946	2908	2261	3168
4126	2318	2917	2589
4453	2663	3288	2939
4671	2356	3534	2638
5249	2218	4200	2510
5374	2989	4348	3280
2401	3287	918	3527
2166	3852	650	4087
2692	3855	1270	4196
3144	3323	1761	3575
3154	3728	1802	3978
3800	3147	2550	3410
4109	3642	2897	3911
4546	3860	3395	4136
4945	3772	3850	4058
5401	3240	4380	3531
1630	4906	89	5131
2339	4807	877	5044
2287	4392	813	4627
2830	4315	1402	4561
3015	4643	1640	4891
3113	4213	1748	4464
3737	4888	2460	5149
4079	4281	2843	4548
4552	4450	3393	4725
5284	4492	4236	4779
2121	5583	634	5817
3081	5637	1709	5883
3274	5289	1934	5544
4086	5532	2863	5805
4353	5287	3159	5557

Scène 149-323a - IMAGE 1		Scène 149-323b - IMAGE 2		
31-07-1987		03-12-1990		
Colonne	Ligne	Colonne	Ligne	ALTITUDE (m)
5079	4495	4232	4782	168
2324	1297	888	1938	832
4045	4172	2788	4438	1063
3235	5234	1888	5487	299
5380	3531	4352	3822	326
5339	2209	4300	2503	871
4285	2487	3077	2763	1118
3071	3259	1676	3510	1402
2514	3257	1042	3499	1666
2852	3561	1443	3808	1081
3248	2570	1929	2825	400
1725	2293	215	2524	780
Coordonnées géographiques des points altimétriques				
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
	33900	5050	168	
	6250	24900	832	
	18650	9350	1063	
	7500	500	299	
	36500	13400	326	
	38200	26600	871	
	26900	26400	1118	
	16950	16350	1402	
	10800	20350	1666	
	7600	17800	1081	
	14950	26900	400	
	6500	34000	780	



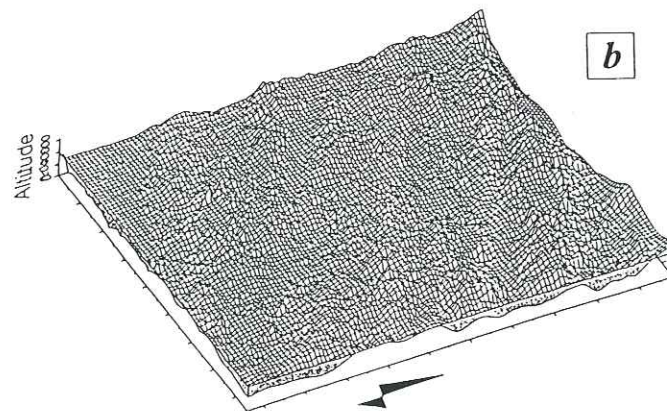
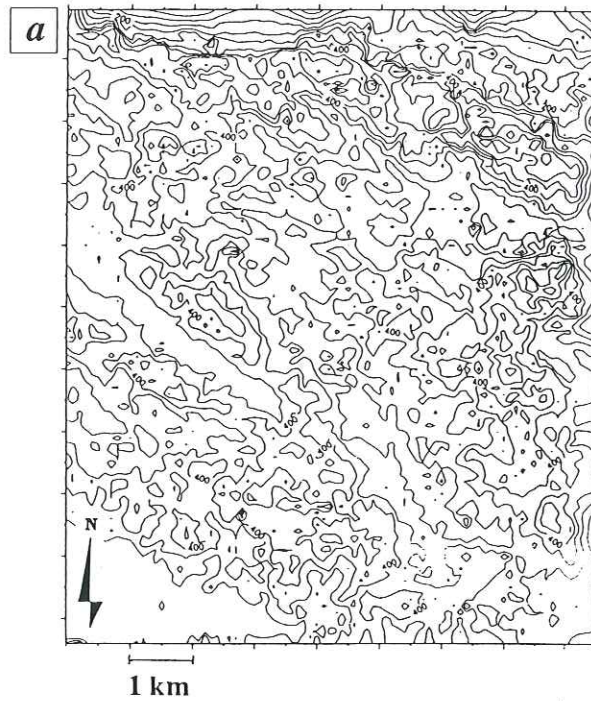
ANNEXE 3 :

Visualisation des MNT utilisés

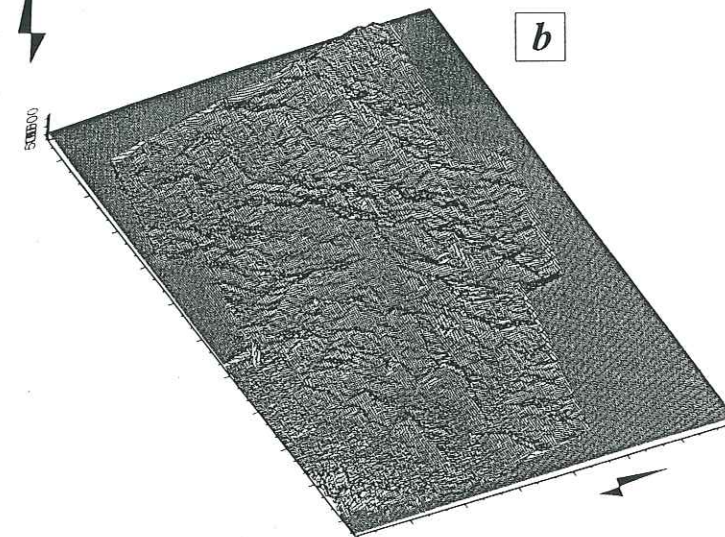
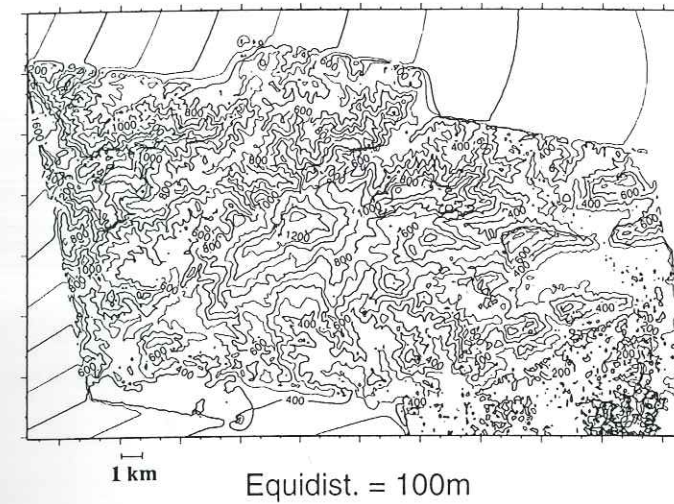
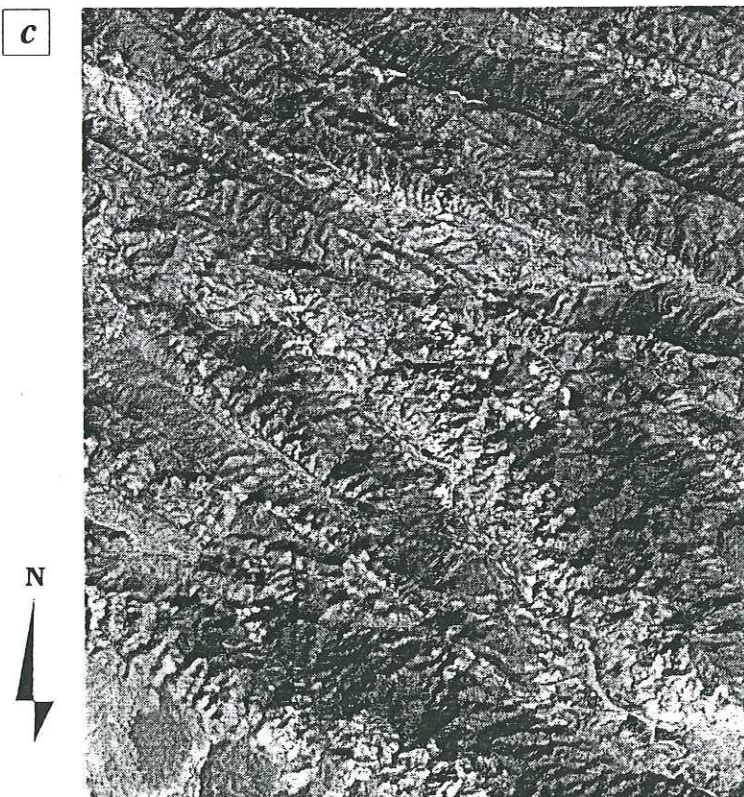
a- en courbes de niveaux

b- en vue perspective

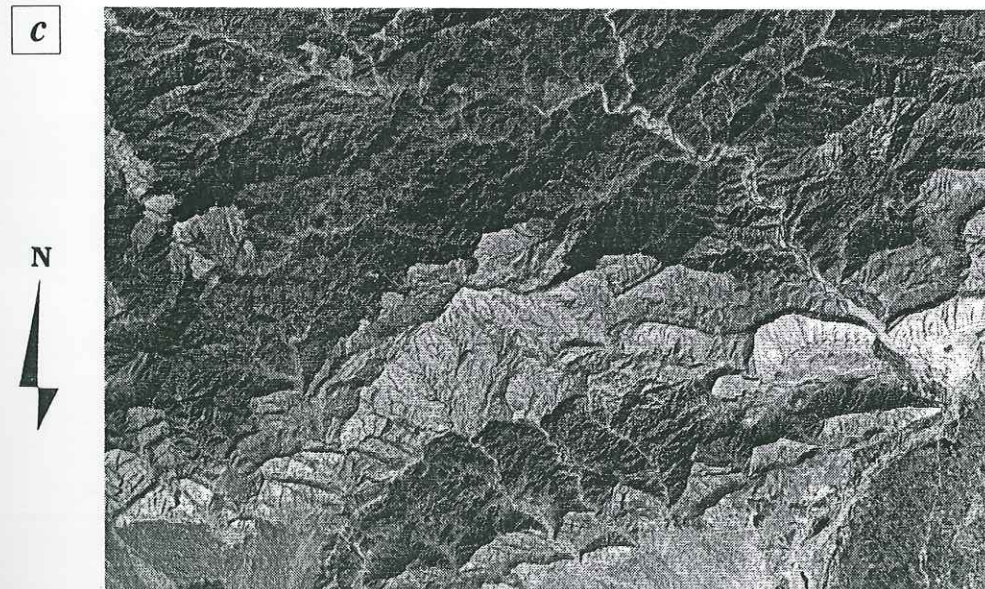
c- ortho-image associée



c



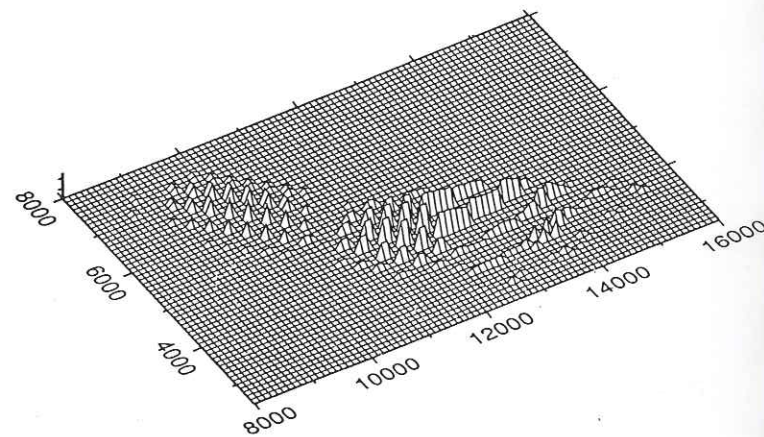
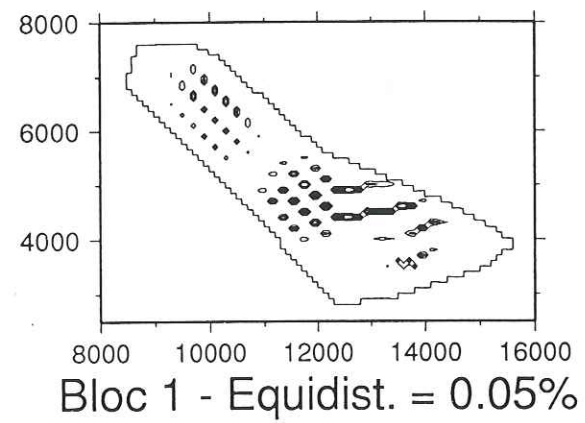
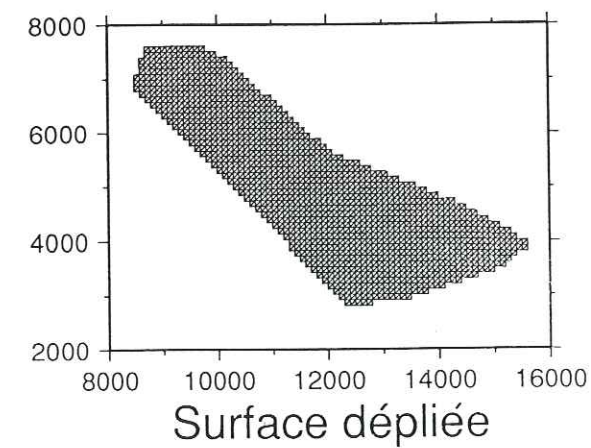
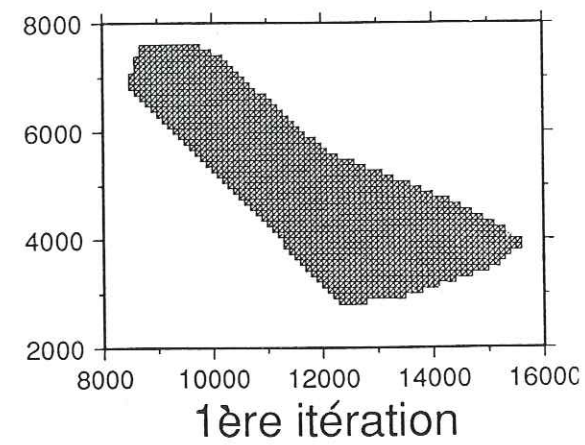
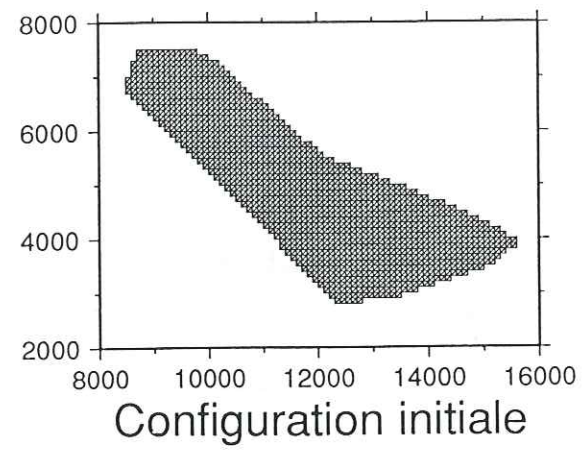
c



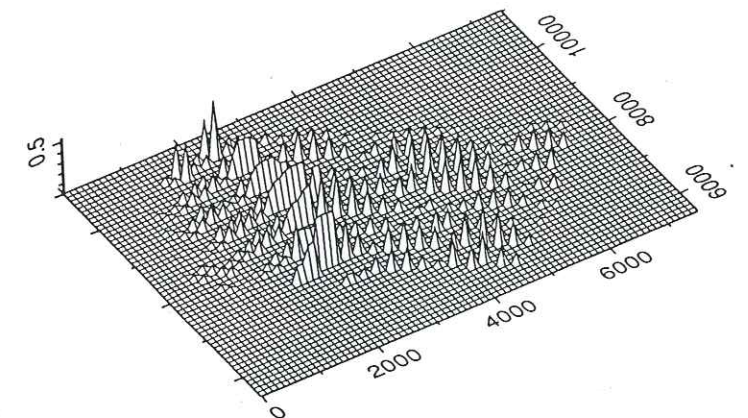
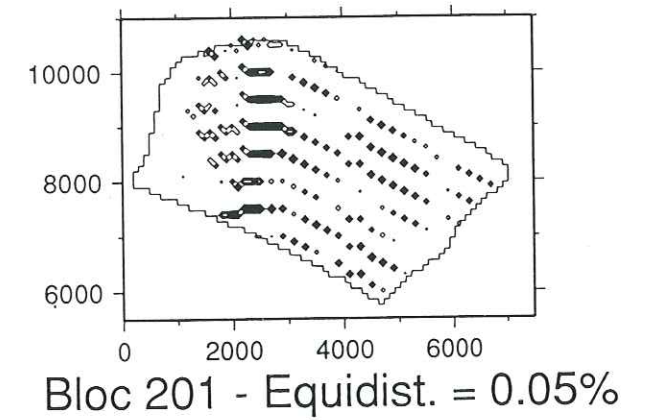
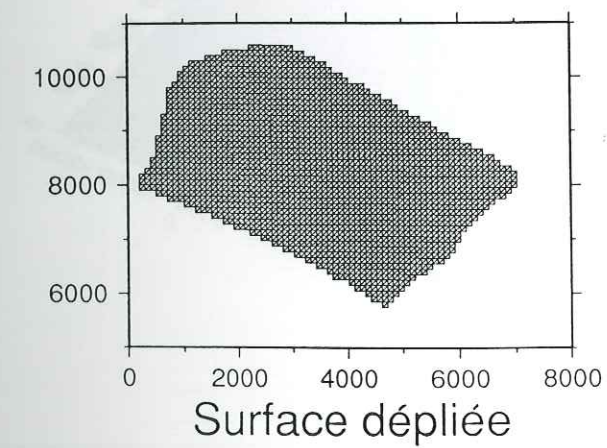
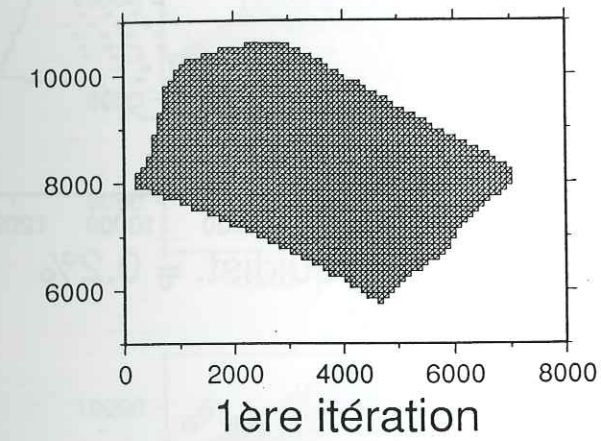
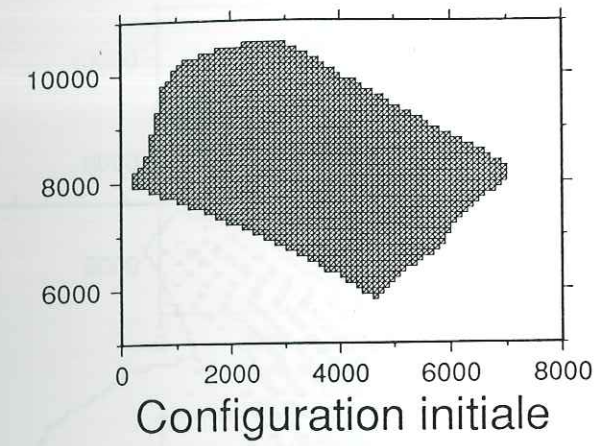
ANNEXE 4 :

Résultats du dépliage des surfaces flexurées
du secteur de Ba'tays

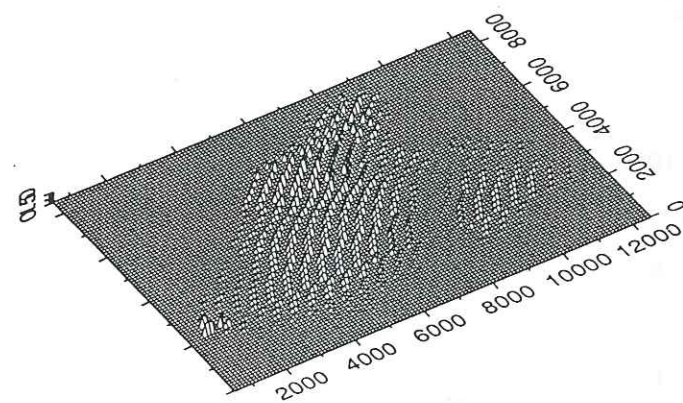
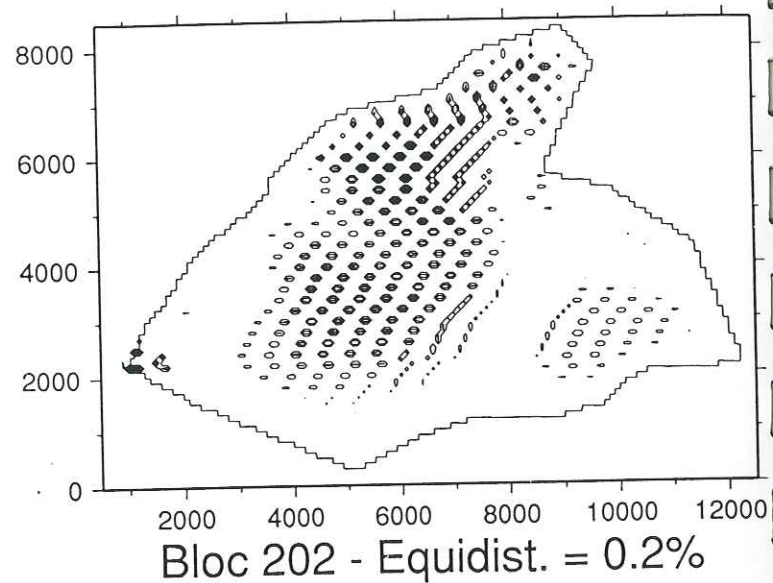
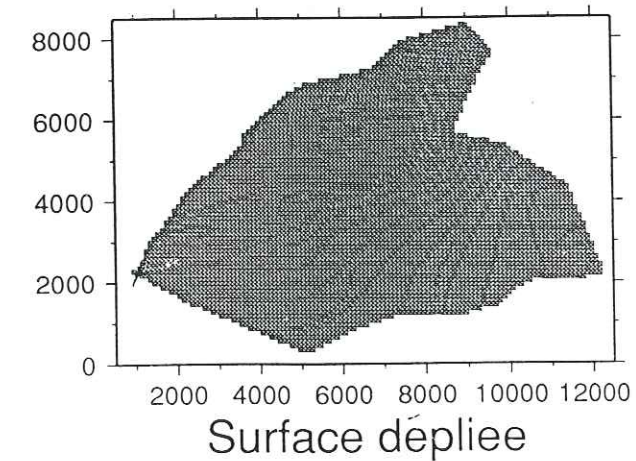
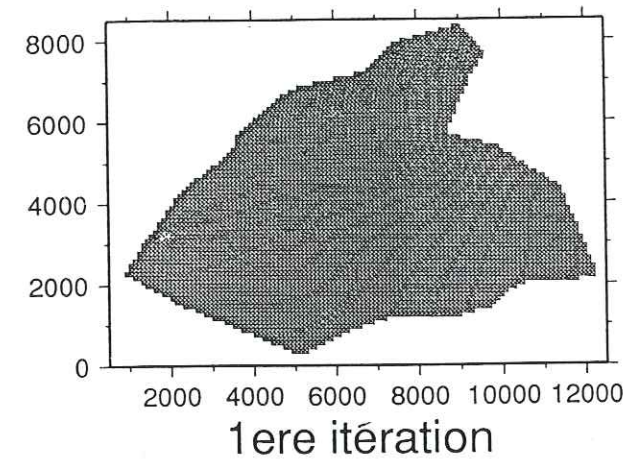
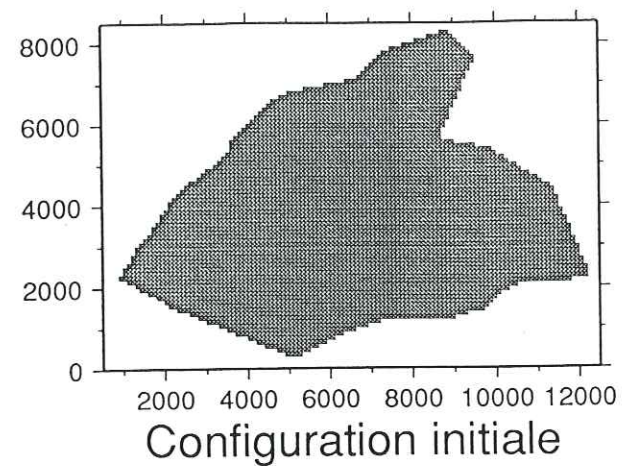
Bloc 1



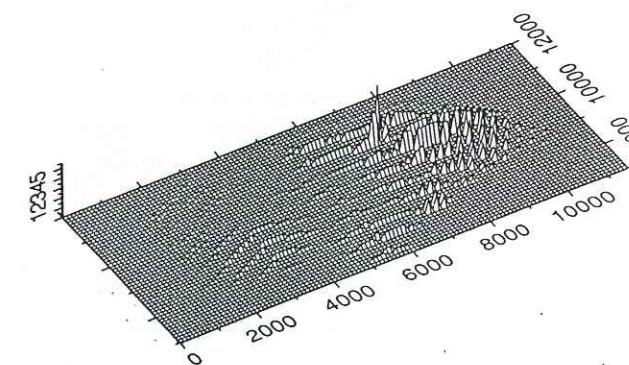
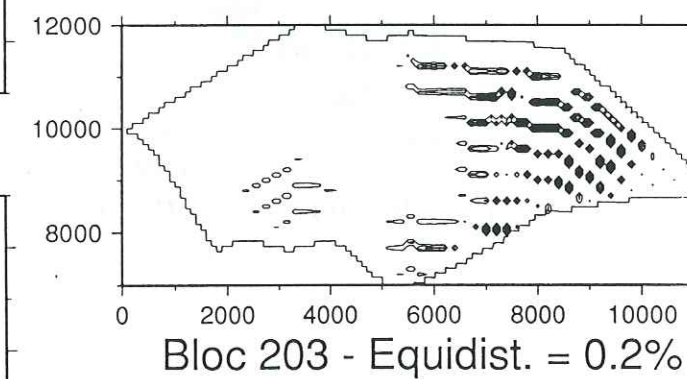
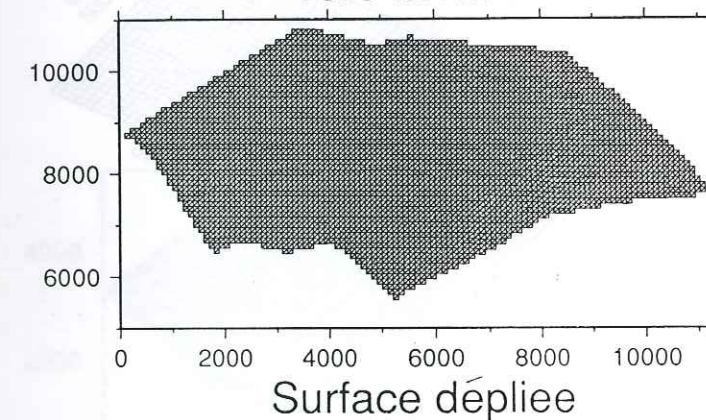
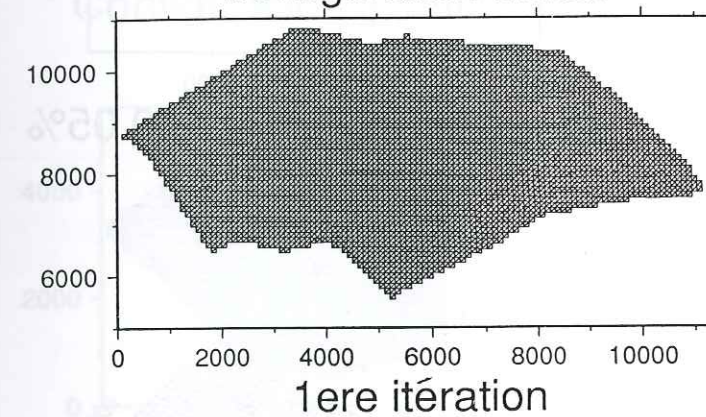
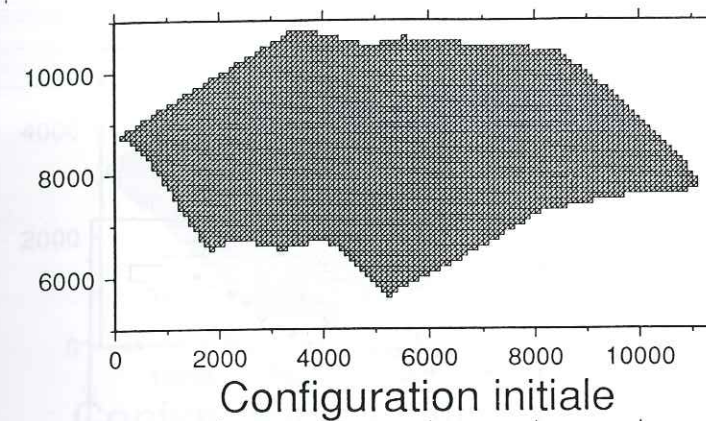
Bloc 201



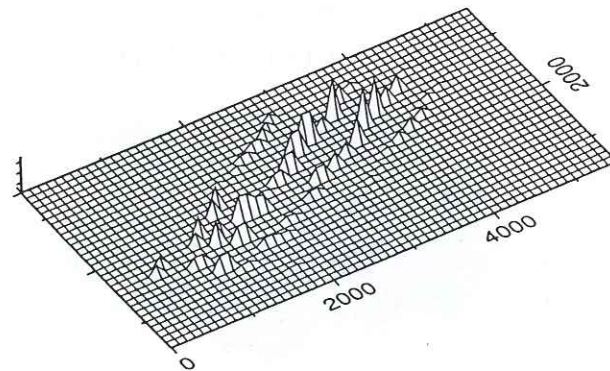
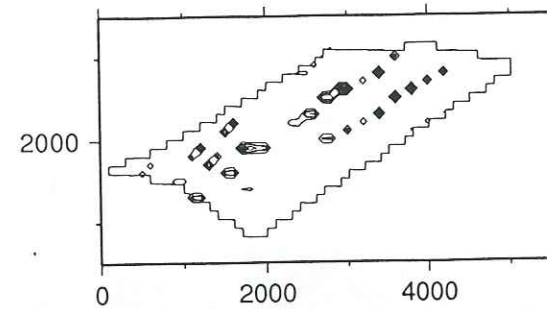
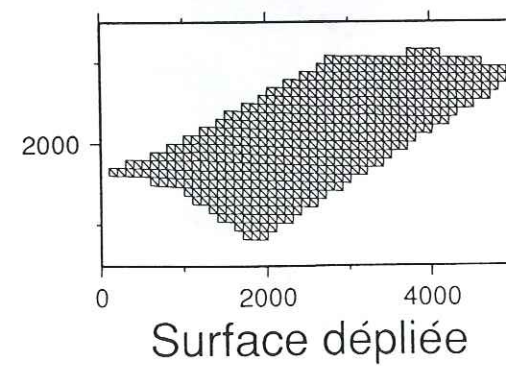
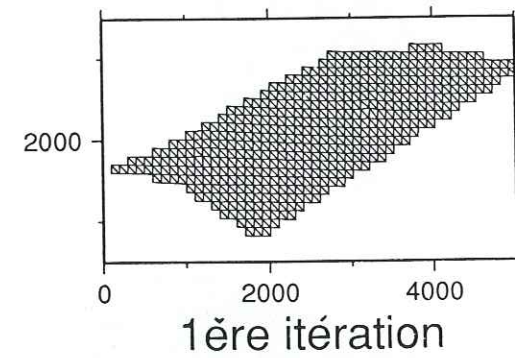
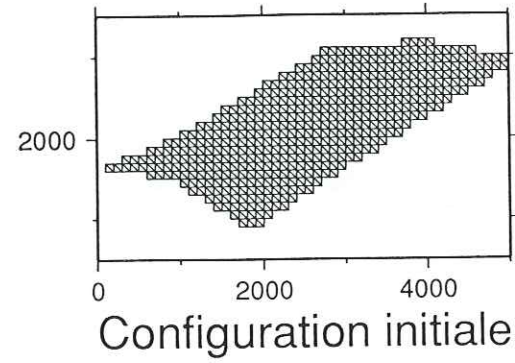
Bloc 202



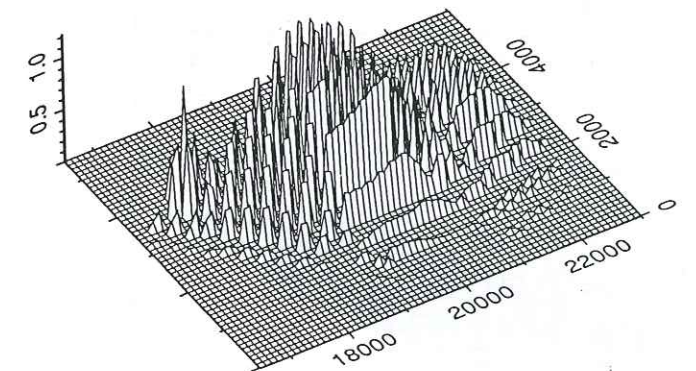
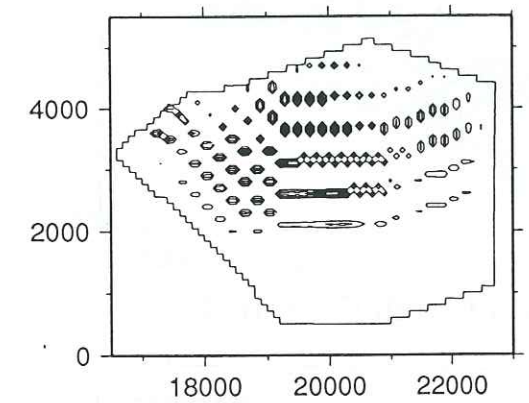
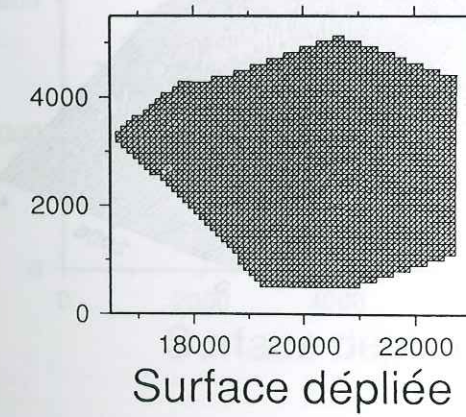
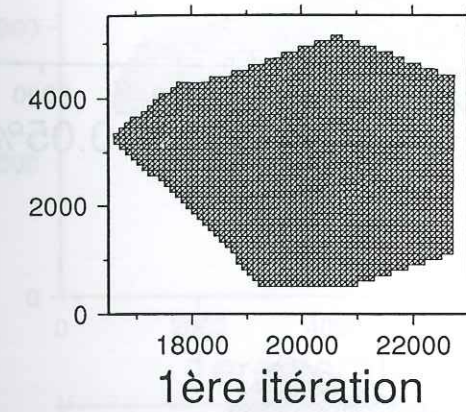
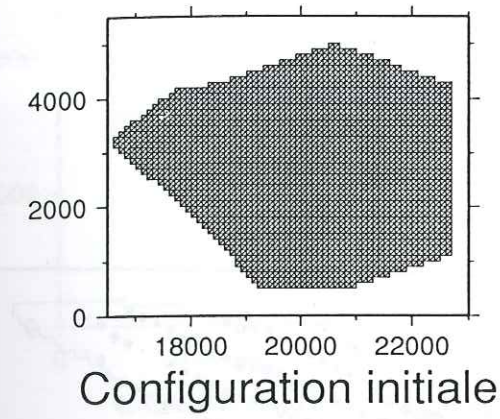
Bloc 203



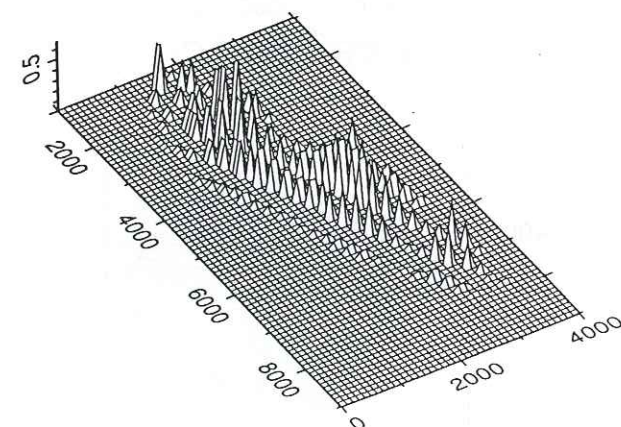
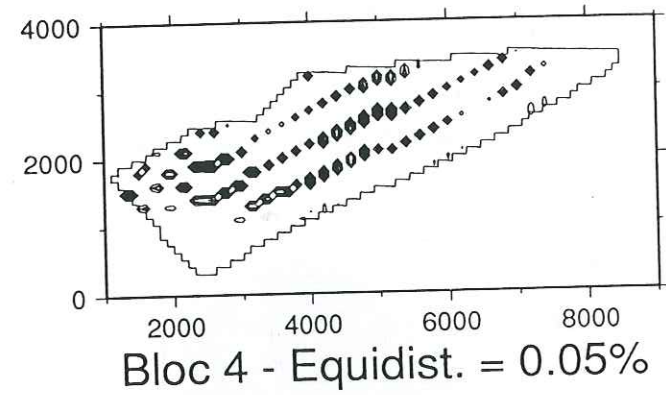
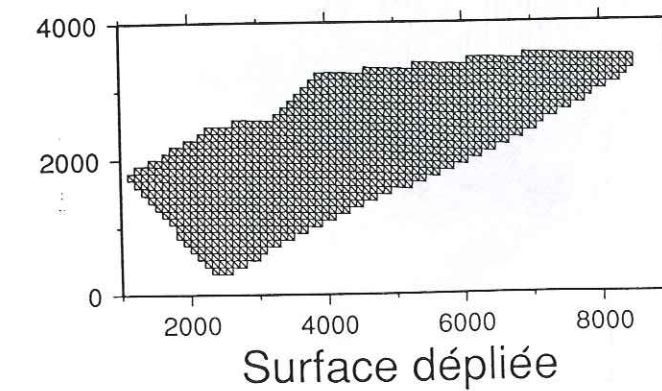
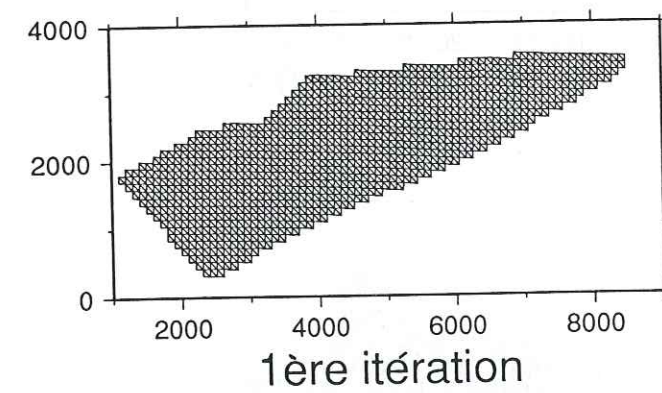
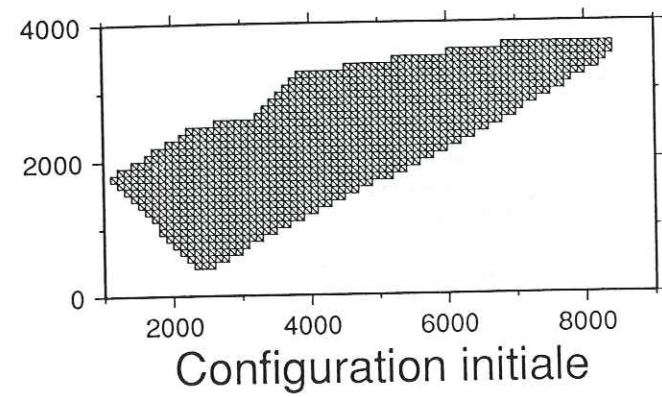
Bloc 204



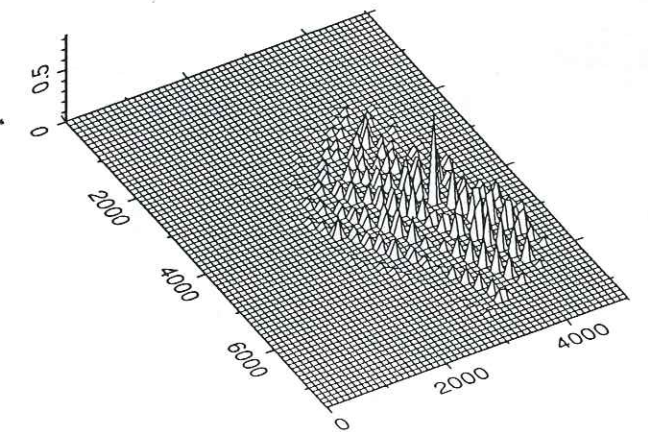
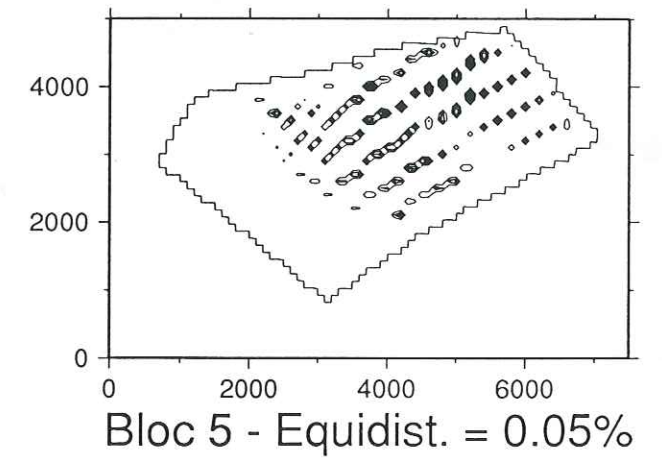
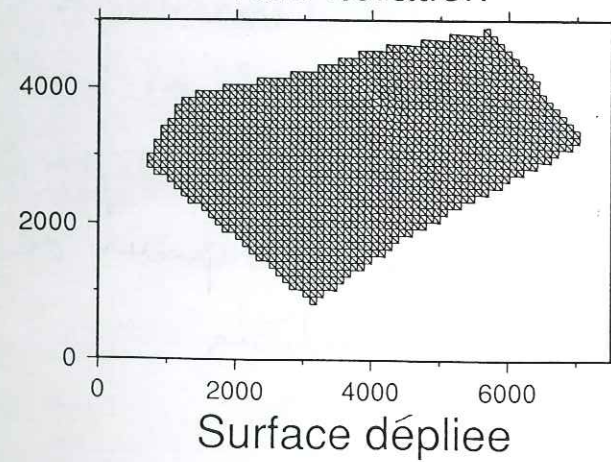
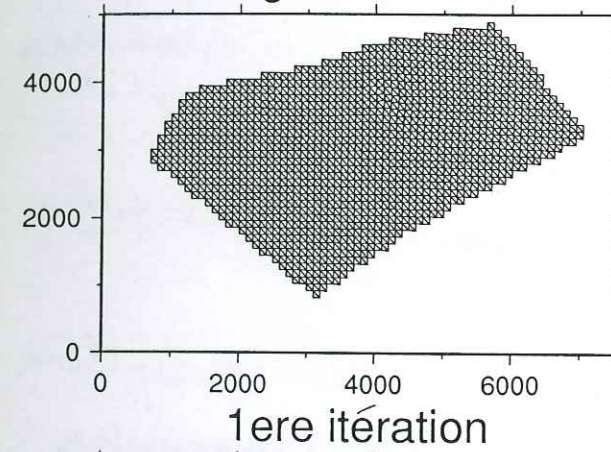
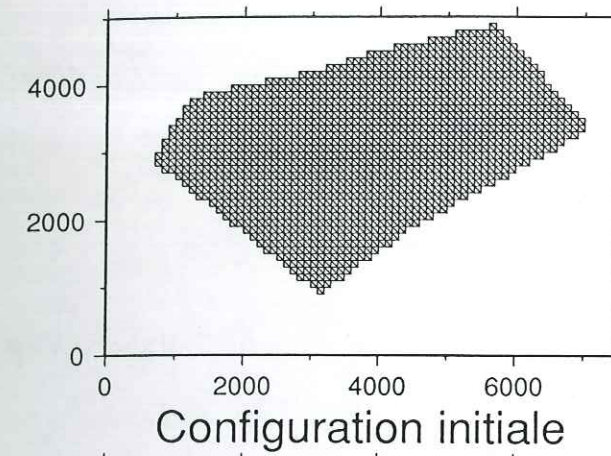
Bloc 3



Bloc 4



Bloc 5



Bloc 5



ANNEXE 5 :

Résultats de l'analyse structurale des secteurs de Umm Shatt, Dhala et Ba'tays

Localisation	Formations affectées	Chronologie	Nb de failles	σ_1	σ_2	σ_3	Φ	Ecart moyen (degrés)
Umm Shatt	calcaires (Crétacé) trapps (Oligo-Miocène)	Phase 1	7	334,62	137,26	231,6	0.78	11.3
		Phase 2	11	332,77	119,10	211,6	0.32	12.2
		Phase 3	6	85,57	264,32	353,1	0.58	12.4
Al Mijza 1	calcaires (Crétacé)	Phase 1	11	343,84	102,3	193,5	0.07	6.05
		Phase 2	8	133,77	332,12	241,4	0.83	13.1
		Phase 3	6	45,53	195,32	295,14	0.19	10.8
Al Mijza 2	trapps (Miocène)		12	324,84	143,5	225,1	0.42	12.05
Al Qabisah	trapps (Miocène)	Phase 1	9	2,82	162,7	237,4	0.23	14.5
		Phase 2	6	17,83	276,1	187,6	0.32	13.3

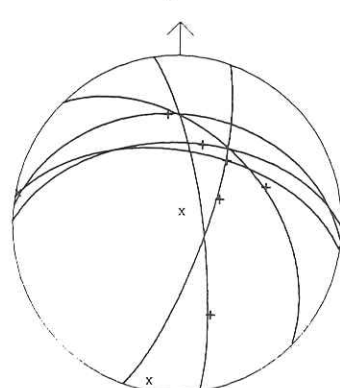
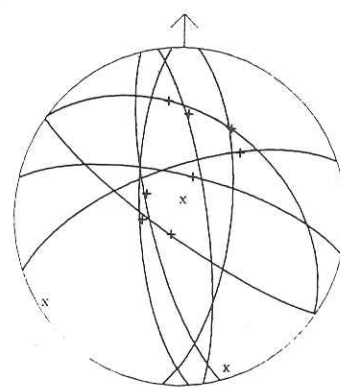
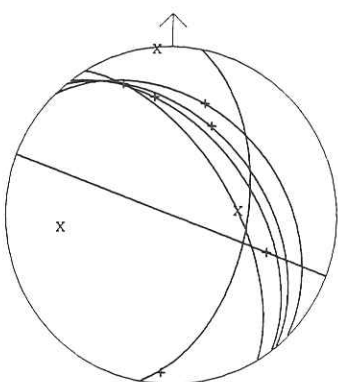
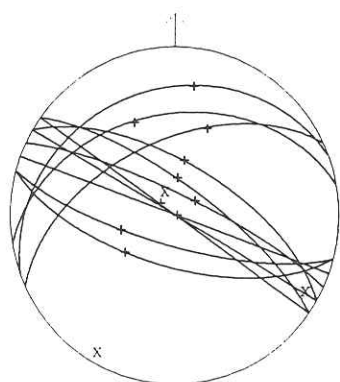
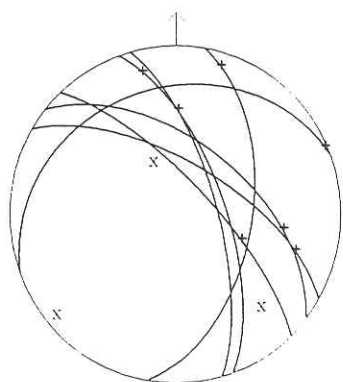
UMS5-1

UMS5-2

UMS5-3

ALQ-1

ALQ-2

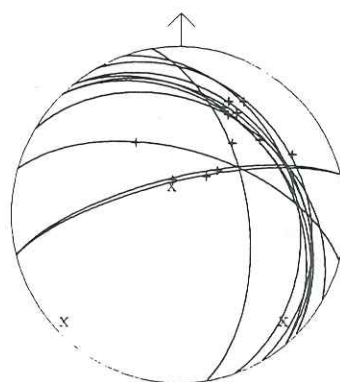
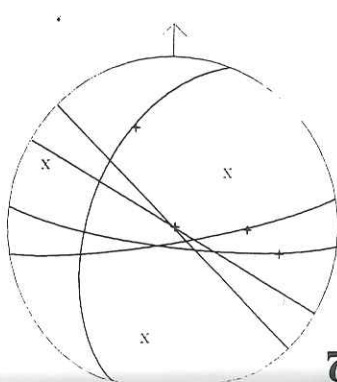
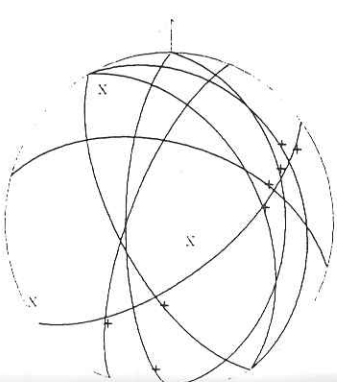
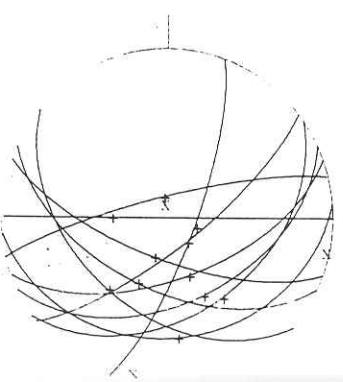


ALM1-1

ALM1-2

ALM1-3

ALM2



5

Localisation	Formations affectées	Chronologie	Nb de failles	σ_1	σ_2	σ_3	Φ	Ecart moyen (degrés)
Dhala 1	calcaires (Crétacé)		17	74,73	249,17	340,2	0.17	9.4
Dhala 3	calcaires (discordance socle panafricain-Crétacé)	Phase 1	6	34,69	160,12	245,16	0.3	12.5
		Phase 2	11	288,56	132,31	35,11	0.49	9.05
Al Habilayn 1	calcaires (Crétacé)	Phase 1	12	62,66	190,15	285,6	0.43	5.3
		Phase 2	15	151,64	302,23	36,12	0.38	6.9
Al Habilayn 3	base des trapps (Miocène)	Phase 1 ?	7	139,44	254,23	355,37	0.42	11.6
		Phase 2 ?	12	108,66	242,17	337,17	0.49	8.4
		Phase 3	10	7,59	129,18	228,25	0.45	5.8
Habil Jabr	calcaires (Jurassique inf.)	Phase 1	6	192,4	305,78	100,10	0.67	8.6
		Phase 2	16	233,77	15,10	106,7	0.38	7.8

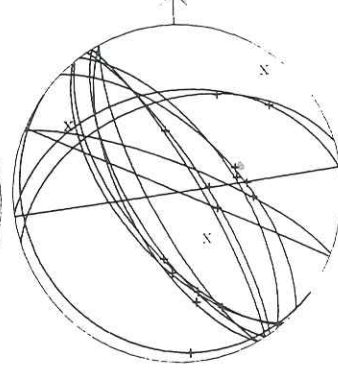
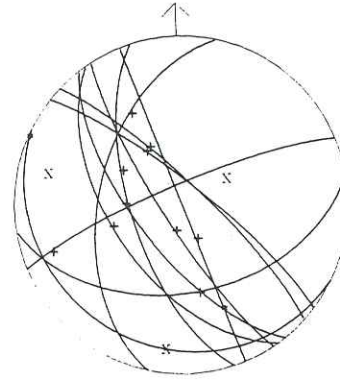
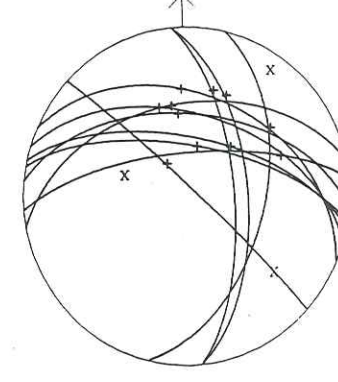
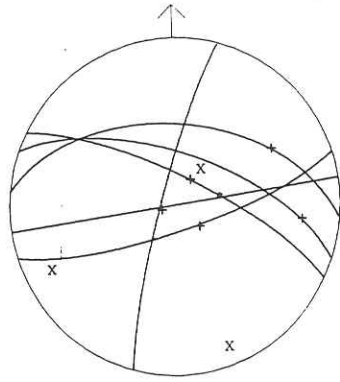
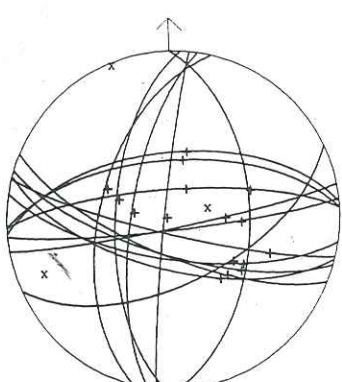
DHA1

DHA3-1

DHA3-2

AHB1-1

AHB1-2



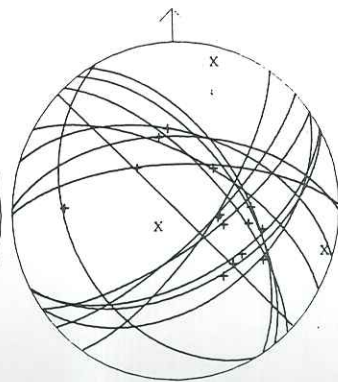
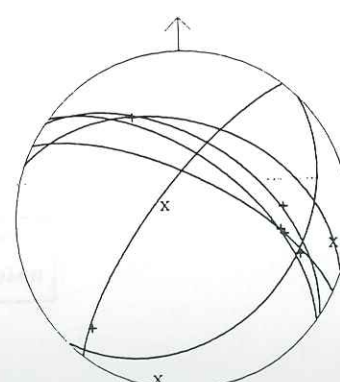
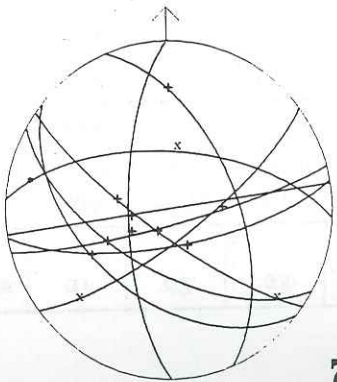
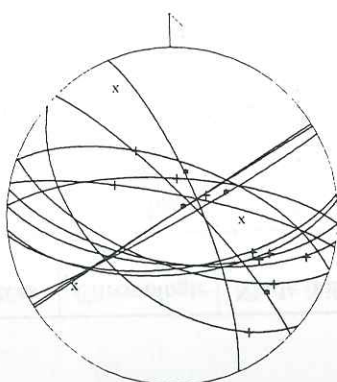
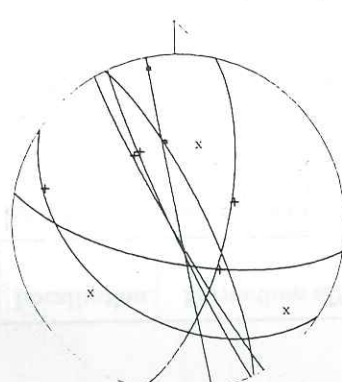
AHB3-(1?)

AHB3-(2?)

AHB3-3

HAB-1

HAB-2

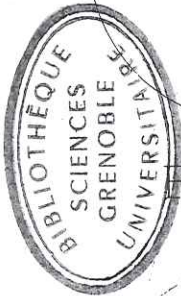


5

Localisation	Formations affectées	Chronologie	Nb de failles	σ_1	σ_2	σ_3	Φ	Ecart moyen (degrés)
Ba'tays 2	calcaires (Jurassique inf.)	Phase 1	6	5,64	159,21	64,13	0.58	9.8
		Phase 2	9	103,37	224,33	342,35	0.9	7.1
Ba'tays 6	calcaires (Jurassique sup.)		9	55,61	300,13	204,24	0.12	7.5
Ba'tays 7	calcaires (Jurassique sup.)		7	43,68	256,19	161,10	0.23	9.4
Al Harur	calcaires (Jurassique inf.)	Phase 1	6	78,51	334,12	236,36	0.49	10.3
		Phase 2	6	96,79	232,7	322,7	0.53	10.08

BAT6

BAT7

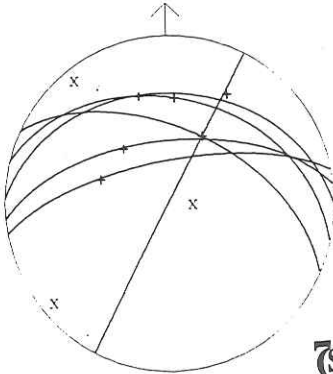
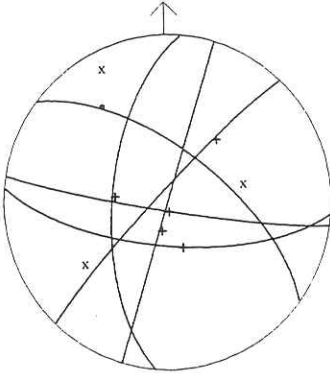
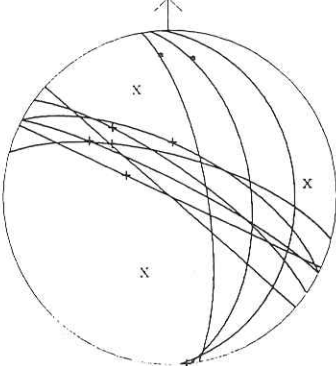
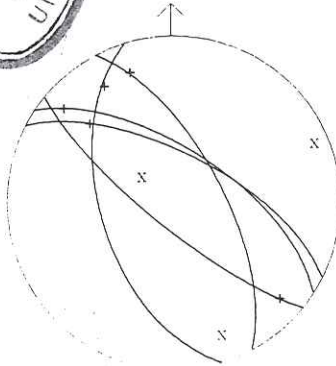
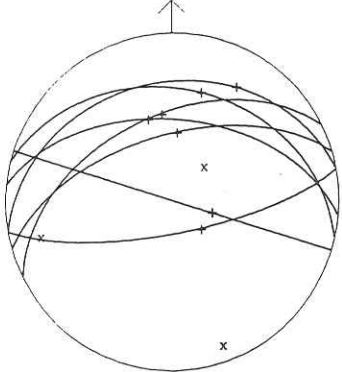
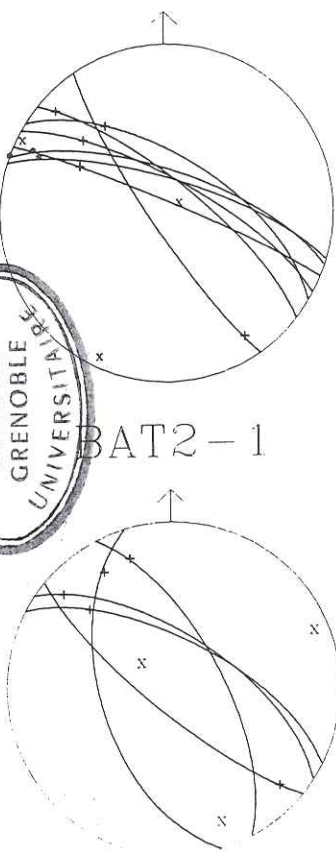


BAT2-1

BAT2-2

ALH-1

ALH-2



Résumé :

La description de la géométrie et de la distribution des structures fragiles présentes dans les rifts contribuent à la compréhension des mécanismes de la déformation extensive à l'échelle de la lithosphère. Une analyse quantitative est envisagée sur une portion du rift Est-africain (Gregory Rift au Kenya) et sur la marge Est de la Mer Rouge (Yémen), à partir de données structurales, d'images satellitaires et de données topographiques.

Les études de terrain permettent de préciser la géométrie et la chronologie des déformations pour chaque objet étudié (Kenya ou Yémen). Le traitement puis l'interprétation des images numériques SPOT ou Landsat TM permet (i) de compléter les études structurales de terrain et de les intégrer à petite échelle, (ii) de quantifier la distribution en deux dimensions (2D) des failles sur le Gregory Rift. Ces études en 2D s'avèrent insuffisantes pour la quantification de l'extension.

L'utilisation de modèles numériques de terrain obtenus par auto-corrélation de couples d'images stéréoscopiques SPOT conduit à la reconstitution de l'état initial, ante-déformation, des systèmes de blocs basculés qui se développent au Yémen. La restauration de l'état initial des blocs basculés comporte une étape "débasculement" ou de dépliage selon le modèle réalisé, et une étape d'ajustement manuel des blocs entre eux. L'ajustement est réalisé en tenant compte soit de la forme des blocs, soit des trajectoires de déformation données par le dépliage des structures.

La comparaison de l'état initial restauré et la connaissance de l'état final déformé permet une approche cinématique de l'extension, en terme de déplacements finis. La quantité d'extension est déterminée. Les champs de déplacements 2D (en carte) sont tracés pour chaque secteur étudié au Yémen. Les déplacements 3D sont calculés et projetés sur les plans de failles séparant les blocs basculés, afin de calculer le tenseur de contraintes associé. L'interprétation des résultats obtenus, combinée à l'étude structurale réalisée sur le terrain ou sur les images, fournit (i) les limites de validité de la méthode de quantification employée, (ii) un modèle de découpage en blocs crustaux du sud de la plaque arabique, (iii) la géométrie des phases précoces lors de l'ouverture du Golfe d'Aden.

Mots-clés :

télédétection; modèles numériques de terrain; extension continentale; champs de déplacements 2D et 3D; restauration; Kenya; Yémen.